BDGI
BAZA DANYCH GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

ZASADY DOKUMENTOWANIA WARUNKÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH NA POTRZEBY PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA I SKŁADOWANIA

Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

BDGI
BAZA DANYCH GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

ZASADY DOKUMENTOWANIA WARUNKÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH NA POTRZEBY PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA I SKŁADOWANIA

(Z WYŁĄCZENIEM SKŁADOWANIA ODPADÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH)

Pod redakcją merytoryczną
Edyty Majer, Marty Sokołowskiej

Sfinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU OCHRONY ŚRODOWISKA i GOSPODARKI WODNEJ

Warszawa 2023
Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Zespół autorski: Edyta MAJER[1], Marta SOKOŁOWSKA[1], Zbigniew FRANKOWSKI[1], Marta ADAMUSZEK[1], Grzegorz CZAPOWSKI[1], Joanna FAJFER[1], Marek JAROSIŃSKI[1], Krzysztof MAJER[1], Monika SZABŁOWSKA[1], Izabela SAMEL[1], Adam WÓJCICKI[1], Sławomir MAZUREK[1], Joanna ROSZKOWSKA-REMIN[1], Michał CYGLICKI[1], Waldemar KORZENIOWSKI[2], Dominik ŁUKASIAK[3], Ewa JAGODA[1]

Konsultacje: Joanna PINIŃSKA[3], Jarosław ZACHARSKI[1], Marta WĄGRODZKA[4], Tobiasz TRACZYK[4]

Współpraca: Michał MALINOWSKI[5], Tomasz BĄK[1], Malwina JUDKOWIAK[1], Anna STAWICKA[1], Grzegorz RYŻYŃSKI[1]

[1] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

[2] Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

[3] Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

[4] Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A.

[5] Fińska Służba Geologiczna (Geological Survey of Finland)

Recenzenci: Paweł ŁUKASZEWSKI, Henryk WOŹNIAK, Piotr ZAWRZYKRAJ

Redakcja, opracowanie typograficzne, skład i łamanie: Ewelina LEŚNIAK

Opracowanie graficzne: Łukasz BORKOWSKI

Projekt graficzny okładki: Monika CYRKLEWICZ
Grafika na okładce ze zbiorów PIG-PIB

Akceptował dnia 30.10.2023 r.
Dyrektor Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego
dr inż. Mateusz DAMRAT

Copyright © by Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2023

ISBN 978-83-67567-41-1

Adres redakcji:
Dział Wydawnictw
Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa
tel. 22 459 2480

SPIS TREŚCI

Przedmowa 7

CZĘŚĆ I
Wybrane aspekty podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji oraz podziemnego składowania odpadów

1. Wstęp 11
2. Ogólna charakterystyka struktur geologicznych i formacji przydatnych do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji oraz podziemnego składowania odpadów 14
2.1. Formacje złóż węglowodorów 15
2.2. Formacje wodonośne 17
2.3. Formacje skalne słaboprzepuszczalne 18
2.4. Formacje złóż węgla kamiennego 19
3. Rodzaje podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów 21
3.1. Podział podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów 21
3.2. Charakterystyka podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów 27
3.2.1. Charakterystyka podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów w naturalnych strukturach geologicznych 27
3.2.1.1. Obiekty w formacjach złóż węglowodorów 27
3.2.1.2. Obiekty w formacjach wodonośnych 30
3.2.1.3. Obiekty w formacjach złóż węgla kamiennego 31
3.2.1.4. Obiekty w naturalnych pustkach skalnych 31
3.2.2. Charakterystyka podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów w strukturach antropogenicznych 32
3.2.2.1. Obiekty w komorach solnych 32
3.2.2.2. Obiekty w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych 34
4. Czynniki i kryteria oceny lokalizacji podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji oraz podziemnych składowisk odpadów 38
4.1. Geologiczne czynniki lokalizacji obiektów podziemnych 40
4.2. Kryteria oceny lokalizacji obiektów podziemnych 45
5. Zagrożenia związane z podziemnym bezzbiornikowym magazynowaniem substancji i podziemnym składowaniem odpadów 59
5.1. Zagrożenia w formacjach złóż węglowodorów 60
5.2. Zagrożenia w formacjach wodonośnych 61
5.3. Zagrożenia w komorach solnych 62
5.4. Zagrożenia w wyrobiskach kopalń podziemnych ze szczególnym uwzględnieniem kopalń soli 63
6. Przegląd krajowych struktur geologicznych i obiektów podziemnych 65
6.1. Przegląd krajowych struktur geologicznych i zakładów górniczych przydatnych do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów 67
6.1.1. Formacje złóż węglowodorów 67
6.1.2. Formacje wodonośne 70

6.1.3. Formacje skalne słaboprzepuszczalne. Struktury solne . . . 70
6.1.4. Wyrobiska kopalń podziemnych . . . 77
6.2. Przegląd istniejących oraz planowanych obiektów podziemnych w Polsce . . . 80
6.2.1. PMG Wierzchowice . . . 83
6.2.2. PKMG Mogilno . . . 84
6.2.3. PSO Husów–Albigowa–Krasne . . . 85
6.2.4. Podziemne składowisko CO_2 Wojszyce . . . 85
6.2.5. Planowane obiekty podziemne . . . 86
7. Przykłady wybranych funkcjonujących i planowanych obiektów podziemnych na świecie . . . 89
8. Podstawy formalnoprawne podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów . . . 98
8.1. Zasady koncesjonowania . . . 99
8.2. Zasady lokalizowania, projektowania, realizacji, eksploatacji i likwidacji obiektów podziemnych . . . 101
8.2.1. Podziemne bezzbiornikowe magazyny substancji . . . 101
8.2.2. Podziemne składowiska odpadów . . . 102
8.2.3. Składowiska dwutlenku węgla . . . 103
8.3. Zasady kontrolowania i monitorowania obiektów . . . 105
8.4. Substancje i odpady przeznaczone do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania lub podziemnego składowania . . . 107
8.4.1. Substancje . . . 110
8.4.1.1. Wodór . . . 110
8.4.1.2. Dwutlenek węgla . . . 112
8.4.1.3. Sprężone powietrze . . . 113
8.4.1.4. Ropa naftowa, gaz ziemny i inne paliwa w stanie płynnym . . . 113
8.4.2. Odpady . . . 113
8.4.2.1. Odpady wydobywcze . . . 113
8.4.2.2. Odpady przeróbcze . . . 115
8.4.2.3. Odpady przemysłowe . . . 116

CZĘŚĆ II

Dokumentowanie warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów

1. Dokumentacja geologiczno-inżynierska w procesie inwestycyjnym. Ryzyko geologiczne . . . 121
2. Dokumentowanie geologiczno-inżynierskie . . . 130
2.1. Zbieranie i analiza danych archiwalnych . . . 131
2.2. Projektowanie i wykonywanie badań geologiczno-inżynierskich . . . 133
2.3. Przetwarzanie, modelowanie, interpretacja, analiza i ocena wyników badań geologiczno-inżynierskich . . . 134
2.4. Przedstawianie wyników badań geologiczno-inżynierskich i archiwizowanie danych . . . 136
3. Zakres i metodyka badań geologiczno-inżynierskich . . . 138
3.1. Prace kartograficzne . . . 139
3.2. Badania geofizyczne powierzchniowe . . . 142
3.2.1. Geofizyka płytka (inżynierska) . . . 142
3.2.2. Geofizyka głęboka . . . 142
3.3. Wiercenia, badania otworowe i opróbowanie . . . 144
3.3.1. Opis i opróbowanie rdzenia wiertniczego . . . 147
3.3.2. Badania geofizyczne otworowe . . . 150
3.3.3. Badania otworowe inne . . . 154
3.4. Sondowania geologiczno-inżynierskie . . . 155
3.5. Badania laboratoryjne gruntów . . . 155
3.6. Badania laboratoryjne skał . . . 155

3.6.1. Badania klasyfikacyjne . . . 156
3.6.1.1. Oznaczanie skały . . . 157
3.6.1.2. Opis materiału skalnego . . . 159
3.6.1.3. Opis masywu skalnego . . . 159
3.6.1.4. Klasyfikacje masywu skalnego . . . 161
3.6.2. Badania petrofizyczne . . . 169
3.6.2.1. Badania chemiczne . . . 170
3.6.2.2. Badania fizyczne . . . 173
3.6.3. Badania geomechaniczne . . . 177
3.6.3.1. Badania dynamiczne. Pomiar prędkości fali sprężystej i wyznaczanie dynamicznych parametrów sprężystości . . . 179
3.6.3.2. Badania statyczne (wytrzymałościowo-odkształceniowe) . . . 180
3.6.4. Zakres badań petrofizycznych i geomechanicznych skał zbiornikowych . . . 195
3.6.5. Zakres badań petrofizycznych i geomechanicznych skał uszczelniających . . . 197
3.7. Badania geochemiczne . . . 198
3.8. Pomiary geodezyjne powierzchniowe . . . 199
3.9. Badania wyrobisk górniczych . . . 199
4. Właściwości fizyczno-mechaniczne i akustyczne . . . 202
5. Modelowanie numeryczne . . . 207
5.1. Metody modelowania numerycznego . . . 211
5.1.1. Model koncepcyjny . . . 211
5.1.2. Model matematyczny . . . 212
5.1.3. Model numeryczny . . . 212
5.1.3.1. Metody numeryczne . . . 212
5.1.3.2. Dyskretyzacja przestrzenna . . . 213
5.1.3.3. Dyskretyzacja czasowa . . . 213
5.1.3.4. Weryfikacja i walidacja modelu . . . 213
5.1.3.5. Kalibracja . . . 214
5.2. Parametry modelowania . . . 214
5.3. Oprogramowanie . . . 214
5.4. Zagadnienia praktyczne modelowania numerycznego . . . 214
5.4.1. Modelowanie strukturalne i strukturalno-parametryczne dla obiektów podziemnych . . . 214
5.4.2. Modelowanie przepływów w warstwach zbiornikowych . . . 218
5.4.3. Modelowanie przepływów w warstwach zbiornikowych sprzężone z geomechaniką . . . 218
5.4.4. Modelowanie geomechaniczne zatłaczania płynów do warstw zbiornikowych . . . 218
5.4.5. Modelowanie szczelności uskoków warstw zbiornikowych i uszczelniających . . . 219
5.4.6. Modelowanie struktur węglowodorowych na obiekty podziemne . . . 219
5.4.7. Modelowanie geomechaniczne dla komór skalnych i wyrobisk kopalń podziemnych . . . 220
5.4.8. Modelowanie geomechaniczne dla kawern solnych . . . 220
5.4.9. Modelowanie procesu ługowania kawern w solach . . . 221
5.4.10. Prawa materiałowe dla soli . . . 221
6. Warunki geologiczno-inżynierskie . . . 225
6.1. Charakterystyka budowy geologicznej . . . 226
6.2. Charakterystyka warunków hydrogeologicznych . . . 226
6.3. Charakterystyka i ocena warunków geologiczno-inżynierskich . . . 229
6.4. Charakterystyka warunków geologiczno-górniczych . . . 235
7. Zawartość opracowań geologiczno-inżynierskich . . . 241
7.1. Zawartość projektu robót geologicznych na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i podziemnego składowania . . . 241
7.2. Zawartość dokumentacji na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i podziemnego składowania . . . 242
7.3. Zawartość dokumentacji na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla . . . 242

8. Gromadzenie danych geologiczno-inżynierskich . . . 263
8.1. Dane geologiczne otworowe . . . 263
8.2. Dane analogowe nieotworowe . . . 264
8.3. Dane cyfrowe nieotworowe . . . 265
8.4. Dane powstające w wyniku badań geologiczno-inżynierskich . . . 265
9. Wykorzystanie systemu informacji przestrzennej GIS do gromadzenia danych geologiczno-inżynierskich . . . 266
9.1. Baza danych . . . 268
9.2. Warstwy wektorowe i rastrowe . . . 269
9.3. Tabele atrybutów . . . 271
9.4. Metadane . . . 272
9.5. Kompozycje mapowe . . . 272
10. Krajowe doświadczenia dotyczące sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i podziemnego składowania . . . 273
10.1. Ogólne dane o obiekcie i lokalizacji w dokumentacjach archiwalnych . . . 273
10.2. Zakres badań i analiz geologicznych w dokumentacjach archiwalnych . . . 275
10.3. Zakres interpretacji i oceny uzyskanych danych w dokumentacjach archiwalnych . . . 276
Terminologia . . . 281
Skróty i symbole . . . 287
Akty prawne i literatura . . . 299
Akty prawne . . . 299
Normy . . . 300
Literatura . . . 301

PRZEDMOWA

Poradnik stanowi zbiór zaleceń w zakresie dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji oraz podziemnego składowania odpadów. Adresowany jest przede wszystkim do geologów inżynierskich, projektantów, inwestorów oraz przedstawicieli administracji geologicznej. Jest to kolejna pozycja z cyklu wydawniczego „Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich", powiększająca zbiór publikacji książkowych w zakresie projektowania, wykonywania i dokumentowania podłoża w związku z realizacją różnego typu inwestycji (http://geoportal.pgi.gov.pl/atlasy_gi/publikacje; dostęp: 21.06.2023 r.).

Poradnik podzielono na dwie części:

- Część I – synteza podstawowych informacji na temat podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów obejmująca: rodzaje struktur i formacji geologicznych, rodzaje obiektów podziemnych, czynniki i kryteria oceny lokalizacji, zagrożenia i ryzyka związane z zagospodarowaniem górotworu we wszystkich fazach realizacji, a także aspekty formalnoprawne w zakresie koncesjonowania, prowadzenia procesu inwestycyjnego oraz rodzajów substancji i odpadów przeznaczonych do podziemnego magazynowania lub składowania. Zawiera również opis wybranych przykładów krajowych i zagranicznych obiektów podziemnych.
- Część II – poradnik wykonywania i sprawdzania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej w odniesieniu do obowiązujących przepisów i dobrych praktyk z uwzględnieniem roli dokumentacji geologiczno-inżynierskiej w procesie inwestycyjnym.

Poradnik powstał w związku z podjęciem krajowych działań na rzecz ograniczania skutków zmian klimatu, transformacji energetycznej, dywersyfikacji źródeł dostaw energii oraz zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. Został on opracowany z myślą o wspieraniu kierunków działań wpisanych w politykę, strategie i programy na poziomie krajowym w zakresie podziemnego magazynowania i składowania, utworzonych w celu realizacji unijnego pakietu „Fit for 55", tj. pakietu aktów prawnych mających na celu zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 55% względem 1990 r. Strategiczne dokumenty krajowe, które wskazują nowe kierunki działań to:

- „Polityka Energetyczna Polski do 2040 r." (Polityka..., 2021);
- „Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040" (Uchwała nr 149 z 2021 r.);
- „Koncepcja przestrzennego zagospodarowania kraju 2030" (Uchwała nr 239 z 2011 r.);
- „Polityka Surowcowa Państwa" (Uchwała nr 39 z 2022 r.).

W świetle wyżej wymienionych dokumentów bardzo istotną rolę w transformacji energetycznej oraz zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych będą odgrywały obiekty służące do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, w tym energii lub do podziemnego składowania odpadów w górotworze.

W obecnej sytuacji geopolitycznej, skutkującej ograniczaniem dostaw ropy i gazu z kierunku wschodniego, magazyny gazu będą miały szczególne znaczenie w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju i zwiększenia rezerw strategicznych.

CZĘŚĆ I

Wybrane aspekty podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji oraz podziemnego składowania odpadów

1. WSTĘP

Podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji oraz podziemne składowanie odpadów są jedną z możliwości zagospodarowania górotworu (przestrzeni podziemnej), które mogą być prowadzone w szerokim przedziale głębokości. Magazyny i składowiska podziemne lokalizuje się zarówno w płytko położonych kopalniach (na głębokości rzędu kilkunastu – kilkudziesięciu metrów), objętych wcześniejszą eksploatacją górniczą, jak i w głębokich strukturach geologicznych (na głębokości do kilku kilometrów). W celu ich poprawnego zaprojektowania, tak żeby późniejsza eksploatacja była bezpieczna, niezbędne jest szczegółowe rozpoznanie warunków geologicznych, geologiczno-inżynierskich, górniczych i hydrogeologicznych

Poradnik jest skierowany głównie do geologów inżynierskich sporządzających dokumentacje geologiczno-inżynierskie na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów w górotworze. Z uwagi na złożoność zagadnień związanych z realizacją tego typu obiektów, przedstawione w poradniku zagadnienia mają charakter interdyscyplinarny. Wymagają one szerokiej wiedzy geologów-dokumentatorów, ponieważ analiza warunków geologiczno-inżynierskich obejmuje zarówno część podziemną, jak i naziemną. Przy projektowaniu części podziemnej konieczna jest wiedza z zakresu górnictwa, geologii i mechaniki górotworu, geologii inżynierskiej, hydrogeologii, geochemii itp., natomiast w przypadku części naziemnej – z zakresu budownictwa i geologii inżynierskiej.

Część I poradnika stanowi syntezę podstawowych informacji na temat podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów. Jej celem jest przybliżenie geologom inżynierskim, opracowującym niezbędne dokumentacje, bardzo złożonej problematyki podziemnego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów. Poradnik zawiera także podsumowanie obowiązujących przepisów, które mogą być pomocne podczas opracowywania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (patrz: cz. I, rozdz. 8).

Z punktu widzenia zagadnień związanych z geologią inżynierską podziemne magazynowanie i składowanie jest regulowane ustawą Prawo geologiczne i górnicze (Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r.; dalej: ustawa pgg), w następującym zakresie:

- koncesjonowania działalności polegającej na bezzbiornikowym magazynowaniu substancji, składowaniu odpadów, składowaniu dwutlenku węgla, w tym także w niektórych przypadkach na poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż kopalin lub kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla;
- projektowania, wykonywania i dokumentowania robót i prac geologicznych;
- prowadzenia ruchu zakładu górniczego i ratownictwa górniczego zarówno dla prac wiertniczych, jak i działalności zakładu górniczego;
- wykonywania robót górniczych;
- wtłaczania wód do górotworu;
- projektowania i realizacji obiektów budowlanych zakładu górniczego;
- likwidacji zakładu górniczego.

Należy podkreślić, że ustawa pgg traktuje oddzielnie trzy rodzaje działalności: podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji, podziemne składowanie odpadów oraz podziemne składowanie dwutlenku węgla. Dokumentowanie geologiczno-inżynierskie dla wszystkich rodzajów obiektów podziemnych obejmuje wiele zagadnień z dziedziny geologii, tektoniki, sejsmologii, geologii inżynierskiej, geotechniki, hydrogeologii, górnictwa, geomechaniki, mechaniki płynów, chemii, technologii składowania lub magazynowania, budownictwa itp., których znaczenie jest uzależnione od różnorodnych czynników. Należą do nich m.in.: rodzaj struktury geologicznej i głębokość na jakiej działalność ma być prowadzona, pojemność docelowa obiektu, rodzaj substancji lub odpadu (w szczególności jego stan skupienia), technologia magazynowania lub składowania oraz ewentualna działalność towarzysząca (np. dalsza eksploatacja w obrębie tej samej struktury, ługowanie, uzdatnianie) i wiele innych. Zakres dokumentowania geologiczno-inżynierskiego zależy także od stanu dotychczasowego rozpoznania.

Szeroki zakres problematyki oraz jej złożoność powodują, że dla każdego obiektu lub struktury powinny powstawać odrębne wytyczne w zakresie projektowania i dokumentowania badań geologiczno-inżynierskich, a więc każdy obiekt podziemny powinien być traktowany indywidualnie. Są jednak wspólne elementy dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich dotyczące zasad projektowania, które omówiono w poradniku.

Układ niniejszej publikacji zawiera pewne uproszczenia, wynikające z faktu, że zgodnie z obowiązującymi przepisami (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) wymagania co do zawartości dokumentacji geologiczno-inżynierskiej są takie same dla podziemnych magazynów i składowisk niezależnie od rodzaju obiektu czy też magazynowanego lub składowanego medium. Ustawodawca (ustawa pgg) wyróżnił

osobno jedynie dokumentacje na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016).

Ustawa pgg nie definiuje terminów *podziemne magazynowanie*, *podziemny magazyn* oraz *składowanie*, jedynie wyróżnia dwa rodzaje obiektów podziemnych: *podziemne składowisko odpadów* i *podziemne składowisko dwutlenku węgla*.

Na podstawie literatury branżowej i modyfikując nieznacznie pojęcia z ustawy pgg, w poradniku zastosowano dwie definicje:

– **podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji** – okresowe przechowywanie substancji bezpośrednio w górotworze w celu jej gromadzenia z zamiarem późniejszego wykorzystania (dalej w treści poradnika zwane w skrócie **magazynowaniem** lub **podziemnym magazynowaniem**);
– **podziemne składowanie odpadów** – trwałe lokowanie w górotworze odpadów lub dwutlenku węgla, które nie zostały zagospodarowane w inny sposób (dalej w treści poradnika zwane w skrócie **składowaniem** lub **podziemnym składowaniem**).

Z powyższego wynikają definicje obiektów podziemnych, w których ta działalność jest prowadzona (dalej w treści poradnika zwane zamiennie **obiektami podziemnymi** lub **obiektami**), tj.:

– **podziemny magazyn substancji** – część górotworu (przestrzeni podziemnej) wykorzystywana na potrzeby przechowywania substancji (zazwyczaj gazowej lub płynnej) w naturalnym środowisku na znacznej głębokości rzędu kilkuset i więcej metrów (Reinisch, 2000; Gąska i in., 2012) (dalej w treści poradnika zwane w skrócie **magazynem** lub **podziemnym magazynem**);
– **podziemne składowisko odpadów** – część górotworu (przestrzeni podziemnej), w tym podziemne wyrobisko górnicze, wykorzystywana w celu unieszkodliwiania odpadów przez ich składowanie (ustawa pgg) (dalej w treści poradnika zwane w skrócie **składowiskiem** lub **podziemnym składowiskiem**);
– **podziemne składowisko dwutlenku węgla** – część górotworu (przestrzeni podziemnej) o określonej pojemności, wykorzystywana w celu trwałego przechowywania dwutlenku węgla, połączona z powierzchniową instalacją zatłaczającą (ustawa pgg) (dalej w treści poradnika zwane w skrócie **składowiskiem** lub **podziemnym składowiskiem**).

W literaturze zagranicznej pojęcia te występują jako: *storage*, *underground storage*, *underground gas storage* (dla magazynów) oraz *underground waste disposal*, *repository*, *deep geological repository, deep geological disposal* (dla składowisk, z wyjątkiem składowiska dwutlenku węgla), a także *geological* CO_2 *storage, geological storage of* CO_2 (dla składowisk dwutlenku węgla). Szczegółowy podział obiektów podziemnych przedstawiono w części I poradnika w rozdziale 3.

Zasadniczą różnicą między magazynem a składowiskiem jest stała lub czasowa oscylacyjna praca magazynu, czyli naprzemienne zatłaczanie i odbieranie medium z obiektu. W składowisku odpady i dwutlenek węgla są deponowane jednorazowo na stałe. Należy mieć jednak na uwadze, że technologie budowy składowisk powinny uwzględniać potencjalne wykorzystanie odpadów w przyszłości. Dlatego też podczas procesu projektowania powinno się uwzględniać takie rozwiązania techniczne, które w przyszłości umożliwią ewentualne wydobycie zgromadzonego odpadu celem jego odzysku.

Każdy magazyn lub składowisko (dalej: **obiekt podziemny** lub **obiekt**) obejmuje część **naziemną** i **podziemną**, dla których obowiązuje odmienny sposób projektowania, a tym samym i rozpoznania geologiczno-inżynierskiego. Obiekty **naziemne** są rozumiane jako obiekt budowlany zakładu górniczego i podlegają przepisom prawa budowlanego, gdyż zgodnie z przepisem art. 106 ustawy pgg: *do projektowania, budowy, utrzymania i rozbiórki obiektów budowlanych zakładów górniczych stosuje się przepisy prawa budowlanego oraz odpowiednio przepisy niniejszego rozdziału i rozdziału 5*. Do części naziemnej zastosowanie będą więc miały w szczególności przepisy o ustalaniu geotechnicznych warunków posadowienia (Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej..., 2012). Dodatkowo zgodnie z zapisami ustawy Prawo budowlane (art. 80 ust. 4) administrację architektoniczno-budowlaną i nadzór budowlany w dziedzinie górnictwa sprawują organy nadzoru górniczego. Do ich zadań należy m.in. wydawanie decyzji administracyjnych. Część naziemną stanowią obiekty budowlane o różnym charakterze, są to np.: obiekty kubaturowe, liniowe (w tym w szczególności rurociągi przesyłowe), place, zbiorniki o charakterze stałym lub tymczasowym, instalacje elektryczne, pompy i pompownie, zakłady ługownicze (w przypadku składowania kawernowego), stacje redukcyjno-pomiarowe, stacje osuszania, podgrzewania i ochładzania gazu, stacje regeneracji glikolu, pomieszczenia dla obsługi, magazyny oraz zbiorniki i wiele innych.

Część **podziemna** jako wyrobisko górnicze jest objęta przepisami ustawy pgg. W sprawach określonych ustawą w dziedzinie górnictwa nadzór sprawują organy nadzoru górniczego. Zgodnie z ustawą pgg wyrobiskiem górniczym jest przestrzeń w nieruchomości gruntowej lub w górotworze powstała w wyniku robót górniczych. Robotą górniczą jest wykonywanie, utrzymywanie, zabezpieczanie lub likwidowanie wyrobisk górniczych oraz zwałowanie nadkładu w odkrywkowych zakładach górniczych w związku z działalnością regulowaną ustawą. Wyrobiskami są zarówno wyrobiska likwidowanych kopalń, jak również kawerny powstałe w procesie ługowania soli, czy warstwy przeznaczone do magazynowania/składowania poprzez zatłaczanie medium otworami wiertniczymi.

W przypadku magazynowania/składowania za pomocą systemu otworowego, granicę projektowania pomiędzy częściami podziemną a naziemną najczęściej stanowi głowica otworu eksploatacyjnego. W przypadku magazynowania/składowania w wyrobiskach podziemnych, granicą projektowania pomiędzy tymi częściami będzie wyjście szybu kopalnianego.

W poradniku stosuje się również poniższe definicje substancji oraz odpadu[1]:

– **substancja** – medium występujące w przyrodzie lub uzyskane za pomocą procesu produkcyjnego wraz z wszelkimi dodatkami wymaganymi do zachowania jego trwałości oraz wszelkimi zanieczyszczeniami powstałymi w procesie produkcyjnym, lokowane w przestrzeni podziemnej (Ustawa z dnia 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach; zmienione);
– **odpad** – każde medium, którego posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do którego pozbycia się jest obowiązany (Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach; zmienione).

Substancje oraz odpady przeznaczone do podziemnego magazynowania i składowania mogą mieć postać płynną, gazową lub stałą. W dwóch pierwszych przypadkach najpowszechniej jest stosowany otworowy system ich deponowania w górotworze. W przypadku substancji lub odpadów w stanie stałym niezbędne do ich wprowadzenia są metody górnicze lub wykorzystanie istniejących wyrobisk górniczych, w których wcześniej była prowadzona eksploatacja. Stan skupienia substancji lub odpadu determinuje zatem ogólne zasady ich depozycji w przestrzeni podziemnej.

W przypadku podziemnego magazynowania lub składowania stosuje się odpowiednie kryteria, według których dane substancje lub odpady mogą (lub nie) być składowane w obiekcie podziemnym. W związku z tym nie wszystkie substancje i odpady są omówione w tym poradniku (patrz: cz. I, rozdz. 8.4).

Bogata terminologia stosowana w literaturze branżowej w różny sposób nazywa pojęcia związane z lokalizacją obiektu, używane są takie terminy jak: lokalizacja, miejsce, formacja, kompleks, struktura itp. W poradniku przyjęto:

– **lokalizacja obiektu podziemnego (lokalizacja)** – część przestrzeni podziemnej i naziemnej, w której jest lub będzie umiejscowiony podziemny magazyn lub składowisko;
– **struktura geologiczna do podziemnego składowania lub magazynowania** (zwana dalej **strukturą**) – udokumentowany element przestrzeni podziemnej, w którym ze względu na budowę geologiczną jest możliwe magazynowanie lub składowanie substancji lub odpadów. Może być zagospodarowana poprzez zatłaczanie substancji lub odpadu bezpośrednio do wybranej formacji/warstwy lub poprzez wykonanie w niej wyrobisk górniczych.

Z kolei w literaturze anglojęzycznej funkcjonuje jedno pojęcie, tzw. *site*, rozumiane jako miejsce, w którym zlokalizowany będzie dany obiekt. Kolejne etapy poszukiwania miejsca lokalizacji obiektu podziemnego są zwane:

– przegląd lokalizacji (*site screening*);
– wybór lokalizacji (*site selection*);
– charakterystyka lokalizacji (*site characterisation*).

Proces inwestycyjny od etapu wyznaczenia miejsca lokalizacji aż do realizacji obiektu podziemnego magazynu lub składowiska jest złożony. Schemat tego procesu i towarzyszących mu etapów badań geologicznych opisano w części II poradnika w rozdziale 1. Ważniejsze definicje zestawiono na końcu publikacji (rozdz. „Terminologia").

Przyjęta w praktyce krajowej ścieżka postępowania wskazuje, że jednym z kluczowych elementów jest uzyskanie koncesji geologicznej (patrz: cz. I, rozdz. 8.1; cz. II, rozdz. 1). Zwyczajowo dokumentacja geologiczno-inżynierska jest wykonywana właśnie na tym etapie, łącznie z dokumentacją hydrogeologiczną, projektem zagospodarowania złoża oraz oceną oddziaływania na środowisko. Jest to etap przygotowania inwestycji, kiedy nie wszystkie aspekty techniczne i technologiczne przedsięwzięcia są znane. Ma to ogromne znaczenie z punktu widzenia zarówno Inwestora, jak i Projektanta, ponieważ trudno jest ponosić duże koszty badań na tak wczesnym etapie, więc są one wykonywane w niewielkim zakresie. Następnie są przygotowywane opracowania uzupełniające: geotechniczne, geośrodowiskowe, eksperckie, analityczne itp. Idealnym rozwiązaniem byłoby sporządzenie dwóch rodzajów dokumentacji geologiczno-inżynierskiej – wstępną i szczegółową, jednak zostało to wiele lat temu usunięte z przepisów pgg, więc obecnie wykonuje się tylko jedną dokumentację na etapie koncesjonowania.

Próbę opisu skomplikowanego procesu inwestycyjnego podjęto w części II poradnika w rozdziale 1 z uwzględnieniem doświadczeń Inwestorów krajowych.

[1] Ustawowe definicje terminów *substancja* i *odpad* zmieniono i dostosowano na potrzeby poradnika. Ich definicje podano także na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA STRUKTUR GEOLOGICZNYCH I FORMACJI PRZYDATNYCH DO PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA SUBSTANCJI ORAZ PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA ODPADÓW

Struktura geologiczna przeznaczona na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub podziemne składowanie odpadów musi się charakteryzować cechami, które umożliwiają bezpieczne funkcjonowanie obiektu podziemnego. Do podstawowych cech struktury/formacji pozwalających na ulokowanie w niej obiektu należą:

- odpowiedni układ formacji w strukturze geologicznej;
- odpowiednia głębokość zalegania, miąższość i pojemność formacji przeznaczonej do magazynowania lub składowania;
- szczelność obiektu;
- brak niekorzystnego wpływu magazynowanej substancji lub odpadu na górotwór;
- brak niekorzystnego wpływu występujących w górotworze zjawisk naturalnych i antropogenicznych na obiekt.

Kolejnymi czynnikami decydującymi o tym czy struktura jest odpowiednia do zlokalizowania w niej danego obiektu są: rodzaj działalności, rodzaj dotychczasowego zagospodarowania formacji oraz stan skupienia substancji bądź odpadu przeznaczonego do magazynowania lub składowania.

Dodatkowo rozpatrywane są także: właściwości formacji przeznaczonej do magazynowania lub składowania, tzw. **warstwy zbiornikowej** (**chłonnej**, **kolektora**) oraz właściwości warstw nadległych, tzw. **warstw uszczelniających** (**izolujących**). Obiekt podziemny lokalizuje się albo w naturalnej przestrzeni porowej formacji zbiornikowej, albo jako wypełnienie naturalnej lub sztucznie utworzonej pustki w obrębie formacji nieprzepuszczalnej. Stąd inne kryteria wyboru struktury będą w przypadku np. zatłaczania substancji lub odpadu do górotworu, a inne w przypadku np. tworzenia kawern w górotworze lub wykorzystywania istniejących pustek.

Poza czynnikami geologicznymi, mającymi wpływ na lokalizację obiektu podziemnego, istotne znaczenie mają też czynniki, które szczegółowo opisano w części I – rozdz. 4.

Jak wspomniano we wstępie, w rozumieniu poradnika strukturą geologiczną dla podziemnego magazynowania lub składowania jest charakterystyczny element budowy geologicznej, w którym skały zalegają w sposób umożliwiający magazynowanie lub składowanie substancji albo odpadu. Na podstawie kryterium wydzielenia litologicznego w obrębie struktury geologicznej można wyróżnić formacje geologiczne. Formacje te mogą wykazywać właściwości zbiornikowe (kolektorskie) lub właściwości uszczelniające (izolujące), zapewnione przez ograniczoną przepuszczalność budujących je skał.

Formacja geologiczna, żeby mogła być rozpatrywana jako warstwa zbiornikowa (kolektor), musi charakteryzować się odpowiednimi parametrami w zakresie miąższości, przepuszczalności, przewodności oraz porowatości lub szczelinowatości, ponieważ są to parametry, które determinują jej pojemność oraz tzw. **chłonność**, tj. możliwość przyjęcia określonej ilości substancji/odpadu w określonym czasie (Uliasz-Misiak, 2009). Czynnikiem koniecznym dla uznania formacji za przydatną jako warstwa zbiornikowa jest jej odpowiednie odizolowanie przez wyżej i/lub niżej leżące utwory nieprzepuszczalne. Najlepsze warunki naturalnej izolacji warstwy zbiornikowej zapewniają **struktury pułapkowe**, w których samo nagromadzenie węglowodorów lub solanek świadczy o ich szczelności. Są to najczęściej górne części antyklin, brzegi synklin lub ograniczone, dobrze izolowane części rozległych masywów skalnych.

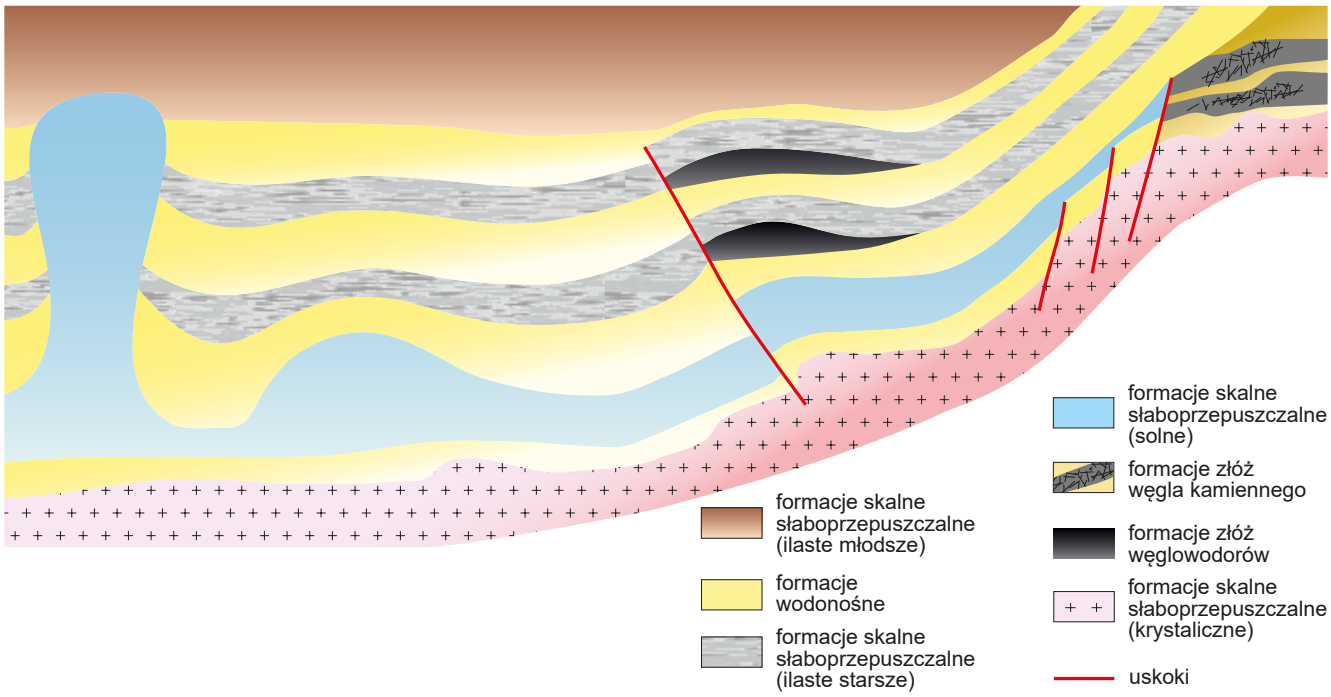
Mając na uwadze powyższe wymogi, tj.: warunki zbiornikowe, szczelność zbiornika i możliwe technologie lokalizowania obiektów podziemnych, wyróżniono następujące typy struktur/formacji geologicznych korzystnych do podziemnego magazynowania substancji lub składowania odpadów:

- **formacje złóż węglowodorów**[2], czyli struktury pułapkowe, w których występują złoża ropy i/lub gazu. Można w nich zlokalizować obiekt podziemny zarówno po wyeksploatowaniu złoża, jak i w formie wspomagania wydobycia (EOR – *enhanced oil recovery*, EGR – *enhanced gas recovery*);
- **formacje wodonośne**, czyli rozległe, izolowane warstwy wodonośne, głównie solankowe (ang. *aquifers*). Utworzenie w nich magazynu wymaga udokumentowania i rozpoznania opartego na kosztownych pracach geologicznych na podstawie analiz archiwalnych i otworów wiertniczych;
- **formacje skalne słaboprzepuszczalne**, czyli naturalnie występujące warstwy skał, które mają miąższość, rozciągłość, ciągłość, jednorodność i właściwości izolacyjne[3] niezbędne do uszczelnienia obiektu podziemnego. Za potencjalne formacje skalne słaboprzepuszczalne uznaje się formacje krystaliczne, ilaste i solne;

---

[2] Na potrzeby poradnika stosuje się termin *formacje złóż węglowodorów*, który należy rozumieć jako *formacje skalne zawierające złoża węglowodorów* lub *złoża węglowodorów*. Ważniejsze definicje podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

[3] Ważniejsze definicje podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".



Rys. 1. Rodzaje struktur geologicznych i formacji perspektywicznych do składowania i magazynowania

– **formacje złóż węgla kamiennego**[4], czyli pokłady węgla kamiennego, w których można zlokalizować obiekt podziemny zarówno przez wykorzystanie pustek poeksploatacyjnych, jak i zatłaczając substancję lub odpad do ich przestrzeni porowych, np. składowanie dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia metanu (CO_2-ECBMR – *Enhanced Coalbed Methane Recovery*).

W zależności od zdolności zbiornikowej przestrzeni porowej, powyższe formacje mogą mieć charakter porowy, szczelinowy lub porowo-szczelinowy.

Z międzynarodowych statystyk wynika, że w złożach węglowodorów znajduje się najwięcej przestrzeni magazynowej gazu – ok. 81% (dane: https://ipi.gasstoragepoland.pl). Na drugim miejscu znajdują się formacje wodonośne – ok. 13%, a na trzecim komory solne (kawerny) – ok. 6%. Niespełna 1% to inne rozwiązania, np. groty skalne lub wyrobiska górnicze. Również w Polsce większość magazynów znajduje się w złożach węglowodorów, natomiast z analizy planowanych obiektów podziemnych wynika (patrz: cz. I, rozdz. 6.2.5), że będą one lokalizowane głównie w strukturach solnych.

Na rysunku 1 przedstawiono schematyczną ilustrację najczęściej wykorzystywanych struktur do lokalizacji obiektów podziemnych.

2.1. FORMACJE ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

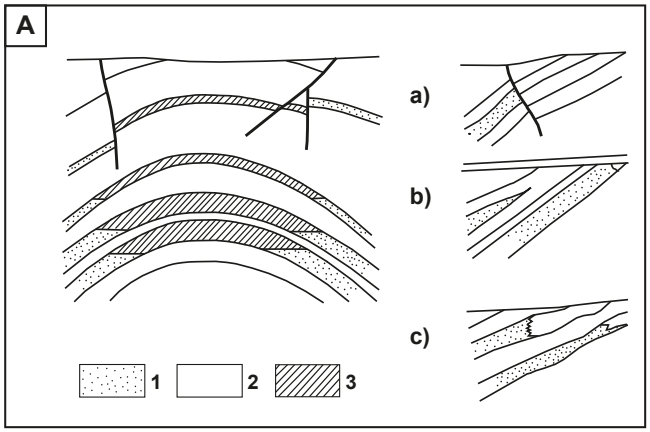
Formacje złóż węglowodorów (pułapkowe), w których są zamknięte złoża węglowodorów, uważa się za jedne z najlepszych struktur do podziemnego magazynowania i składowania. Ich naturalną szczelność potwierdza nagromadzenie ropy lub gazu. Najliczniej są związane z antyklinami. Struktury te są dobrze przebadane na etapie rozpoznania złoża i jego eksploatacji. Działalność magazynowa może się także odbywać w eksploatowanych złożach, co jednocześnie zapewni wspomaganie wydobycia węglowodorów (EOR, EGR). Technologia ta jest szczególnie rozwinięta w Stanach Zjednoczonych Ameryki (Wójcicki i in., 2013).

Levorsen (1972) wyróżnia trzy rodzaje pułapek: strukturalne, stratygraficzne i stratygraficzno-strukturalne. Pułapki strukturalne powstają na skutek deformacji tektonicznych. Pułapki stratygraficzne tworzą się, gdy następuje zmiana stratygraficzna lub litologiczna (np. facjalna) powodująca zmianę porowatości i przepuszczalności w obrębie struktury. Pułapki stratygraficzno-strukturalne powstają w wyniku połączenia czynników tektonicznych i stratygraficznych. Według innych klasyfikacji (Karnkowski, 1993) pułapki można podzielić na: zamknięte tektonicznie (w antyklinach, wokół wysadów solnych lub intruzji skał magmowych) oraz zamknięte stratygraficznie (w wyklinowujących się warstwach, pogrzebanych, zamkniętych facjalnie). Liszka (1982) wyróżnia złoża związane ze zjawiskami tektonicznymi (np. w sfałdowanych warstwach czy strefach uskokowych) oraz z ukształtowaniem i litologią warstw (np. w soczewach piaskowcowych w obrębie iłowców lub szczelinowatych strefach skał węglanowych). W przypadku zbiorników warstwowych w takim ujęciu rozróżnia się pułapki tektoniczne, stratygraficzne i litologiczne (rys. 2A), natomiast w przypadku

[4] Na potrzeby poradnika stosuje się termin *formacje węgla kamiennego*, który należy rozumieć jako *formacje skalne zawierające złoża węgla kamiennego* lub *złoża węgla kamiennego*. Ważniejsze definicje podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

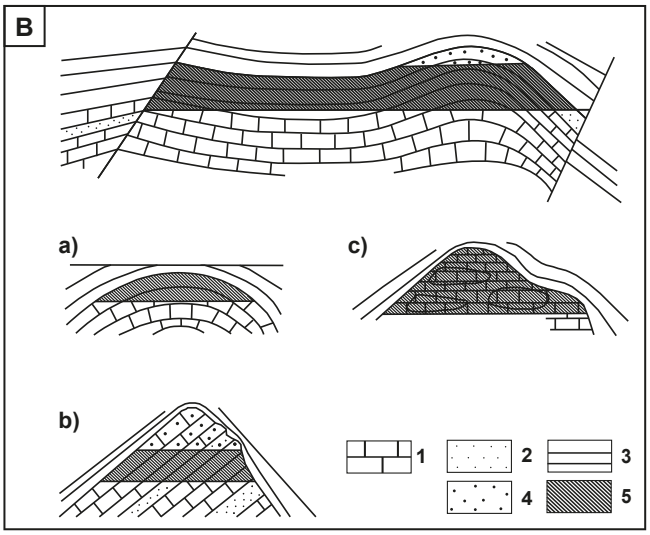
zbiorników masywowych (rys. 2B) – pułapki strukturalne, erozyjne i biogeniczne (w utworach rafowych).

W strukturach pułapkowych węglowodory gromadzą się w utworach o znacznej porowatości i przepuszczalności, wynikającej z istnienia w skale porów międzyziarnowych lub szczelin (Liszka, 1982). W pozostałych skałach ropa i gaz występują sporadycznie, jedynie w obrębie stref uskokowych i dyslokacji tektonicznych.



1 – skała zbiornikowa, **2** – skała o niskiej przepuszczalności, **3** – ropa naftowa i gaz ziemny

a – pułapka tektoniczna, **b** – pułapka stratygraficzna, **c** – pułapka litologiczna



1 – wapienie, **2** – piaskowce, **3** – skały o niskiej przepuszczalności, **4** – gaz ziemny, **5** – ropa naftowa

a – pułapka strukturalna, **b** – pułapka erozyjna, **c** – pułapka biogeniczna

Rys. 2. Rodzaje pułapek węglowodorowych w zbiornikach warstwowych (A) i masywowych (B) wg Karnkowskiego, 1993

Przydatność formacji złóż węglowodorów do lokalizowania obiektów podziemnych rozpatruje się, oceniając cztery zasadnicze kryteria (Parczewski, 2008; Piesik-Buś, 2016):

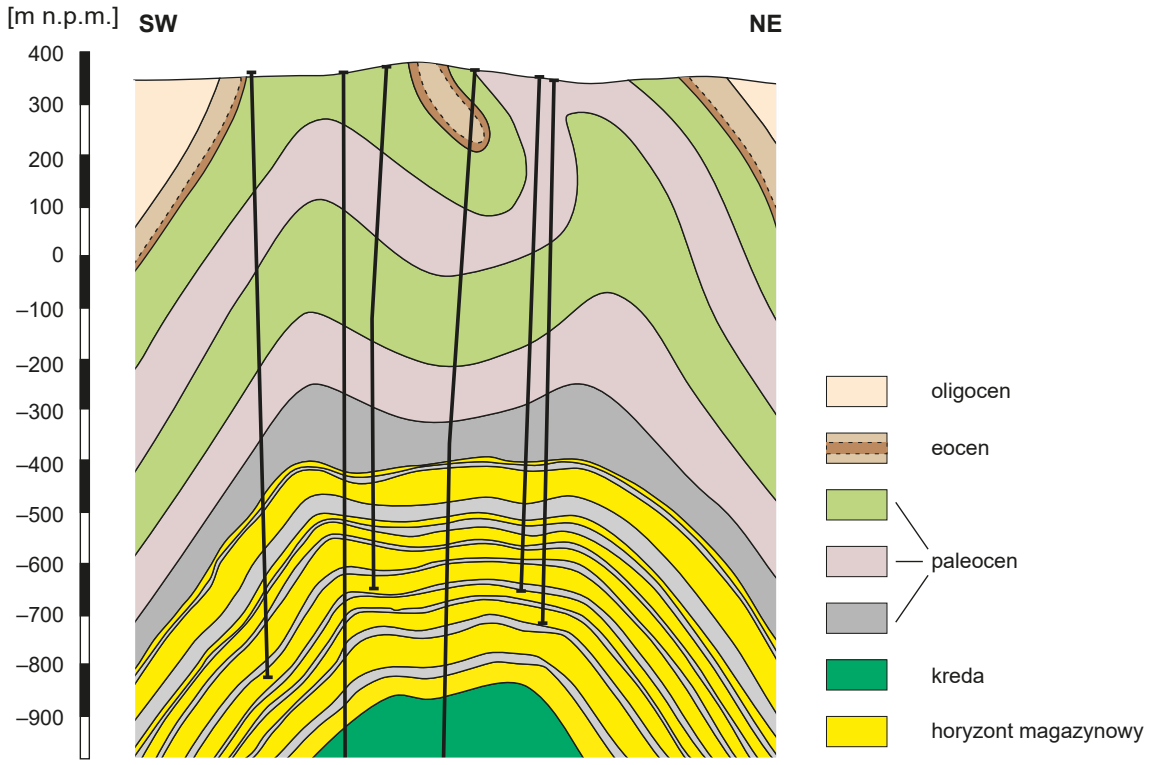
- kryterium strukturalne – obiekt powinien stanowić pułapkę strukturalną, stratygraficzną lub stratygraficzno-strukturalną;
- kryterium zbiornikowe – warstwa zbiornikowa musi charakteryzować się odpowiednią porowatością i przepuszczalnością;
- kryterium szczelności – warstwa zbiornikowa powinna być izolowana od stropu i spągu utworami nieprzepuszczalnymi;
- kryterium głębokości – warstwa zbiornikowa powinna znajdować się na odpowiedniej głębokości, tj. powinna być dostępna technologicznie i ekonomicznie.

W Polsce korzystne formacje złóż ropy naftowej i/lub gazu występują w Karpatach, zapadlisku przedkarpackim oraz na Niżu Polskim (Depowski, 1973). Ze względu na to, że nie są to duże struktury, bardzo szybko ulegają wyeksploatowaniu (w porównaniu ze strukturami w Wenezueli czy Arabii Saudyjskiej), co jest korzystne z punktu widzenia zmiany funkcji po wyczerpaniu złoża. Zlokalizowane są głównie w utworach permu, rzadziej kambru, dewonu i karbonu (środkowa i południowa Wielkopolska oraz Pomorze Zachodnie) oraz jury, kredy i trzeciorzędu[5] (Karpaty i zapadlisko przedkarpackie) (Czapowski, 2006). W Polsce (wg stanu na 2022 r.) dziewięć obiektów podziemnych (z 12 czynnych) jest zlokalizowanych w strukturach węglowodorowych (2 składowiska i 7 magazynów). Skałami zbiornikowymi są **piaskowce**, **dolomity** i **wapienie**.

Najbardziej typowy przykład, pod względem strukturalnym, stanowi położony na terenie gmin Sanok i Brzozów w województwie podkarpackim podziemny magazyn gazu w Strachocine (rys. 3). Obiekt jest położony w obrębie fałdu Sanok–Strachocina–Zmiennica–Czarnorzeki, w obrębie jednostki śląskiej Karpat fliszowych w wyeksploatowanym złożu gazu „Strachocina", odkrytego już w latach 20. XX w. (Gąska i in., 2012). Fałd jest zbudowany z utworów kredy i paleogenu, a złoże występowało w jego środkowej części. Magazyn utworzono w 1982 r., po jego wyeksploatowaniu.

Struktury węglowodorowe przydatne do lokalizacji obiektów podziemnych w Polsce szczegółowo opisano w części I poradnika w rozdziale 6.1.1.

[5] Obecnie termin *trzeciorzęd* ma już znaczenie tylko historyczne, erę kenozoiczną dzieli się na trzy okresy: paleogen, neogen i czwartorzęd.



Rys. 3. Schematyczny przekrój przez magazyn gazu w wyeksploatowanym złożu gazu w obrębie fałdu Strachocina (wg Gas Storage Poland)

2.2. FORMACJE WODONOŚNE

Formacje wodonośne to przede wszystkim głębokie, izolowane poziomy wodonośne, najczęściej solankowe, o znacznym rozprzestrzenieniu, przepuszczalności i miąższości. Z uwagi na brak wcześniejszego zagospodarowania zazwyczaj są słabo rozpoznane. Utworzenie w nich magazynu wymaga więc wykonania licznych otworów wiertniczych i kosztownych badań dotyczących szczelności warstw nadległych oraz parametrów warstwy chłonnej.

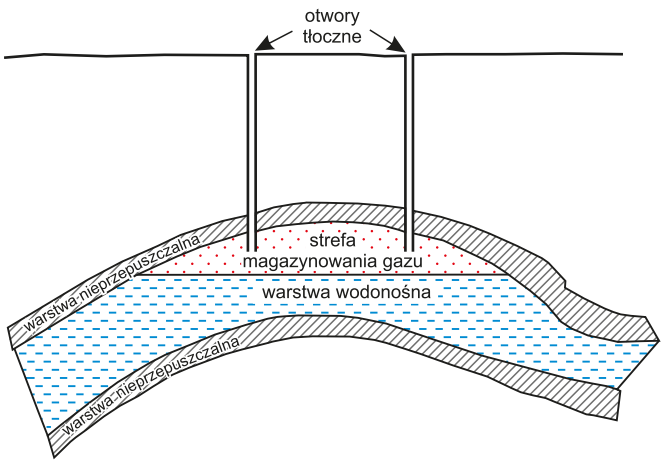
Warunkiem utworzenia obiektu w tego typu strukturach jest duża porowatość warstwy chłonnej. Parametrami definiującymi porowatość (tj. stosunek objętości pustych przestrzeni w skale do całej jej objętości) są porowatość bezwzględna i efektywna, przy czym ta pierwsza dotyczy wszystkich porów w skale, natomiast druga – porów skomunikowanych ze sobą w skale zbiornikowej. Poziom ten musi charakteryzować się odpowiednio dużą przepuszczalnością, miąższością i przewodnością. Z tego powodu za najbardziej perspektywiczne poziomy uznaje się formacje wykształcone w **piaskowcach**. Tak jak w przypadku struktur węglowodorowych, istotnym czynnikiem jest tutaj izolacja warstwy chłonnej praktycznie nieprzepuszczalnym stropem i spągiem, które będą ograniczały migrację substancji lub odpadu poza warstwę chłonną. Zakłada się, że warstwy magazynowe muszą być izolowane nadkładem o przepuszczalności definiowanej współczynnikiem filtracji pionowej ok. 10^{-11} m/s o miąższości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów w zależności od ilości odpadów (Ślizowski K., 2002). Istotna jest również głębokość zalegania warstwy chłonnej. Należy unikać ewentualnych kontaktów z użytkowymi poziomami wodonośnymi, stąd przyjmuje się, że głębokość ta powinna wynosić 500–2000 m. Jej minimalna miąższość to 15 m przy założeniu ilości substancji lub odpadu nie większej niż 10 000 m^3 na rok (Ślizowski K., 2002).

W przypadku składowania dwutlenku węgla w formacjach wodonośnych bardzo istotny jest także problem ingerencji zatłaczanego medium w istniejące środowisko hydrochemiczne. Mechanizmy wiązania dwutlenku węgla są różne: może to być, rozpatrując coraz to dłuższe przedziały czasowe, pułapkowanie hydrodynamiczne, rozpuszczanie w wodzie oraz reakcje geochemiczne (Bachu, Adams, 2003).

W przypadku zatłaczania substancji lub odpadu w formacje wodonośne zachodzi również możliwość wystąpienia negatywnych zjawisk, takich jak (patrz: rozdz. „Terminologia"): kolmatacja skały zbiornikowej w strefie przyodwiertowej, w związku z osadzaniem się cząstek stałych w porach, sufozja, pęcznienie skały zbiornikowej oraz jej rozpuszczanie przez zatłaczaną ciecz (Kluk, 2020). Czynnikiem wykluczającym warstwę z możliwości lokalizacji obiektu podziemnego jest także występowanie aktywności sejsmicznej oraz uskoku o znacznym lub nieznanym zasięgu.

Schemat struktury wodonośnej wykorzystanej do magazynowania substancji przedstawiono na rysunku 4.

W Europie najwięcej magazynów gazu w formacjach wodonośnych znajduje się we Francji i w Niemczech. W Polsce w tych strukturach nie funkcjonuje obecnie żaden obiekt. Wyjątkiem jest zatłaczanie wód złożowych z powrotem do złoża przy okazji prowadzenia eksploatacji górniczej. W Polsce struktury te są rozpatrywane głównie w kontekście



Rys. 4. Schemat pułapkowej struktury wodonośnej wykorzystanej do magazynowania sprężonego powietrza (Kushnir i in., 2012, tłumaczenie)

składowania dwutlenku węgla. Największy potencjał do składowania CO_2 mają głębokie solankowe poziomy na obszarze Niżu Polskiego (Tarkowski i in., 2009a). Są to głównie mezozoiczne poziomy wodonośne, w szczególności jurajskie i kredowe, w obrębie antyklin rejonu łódzkiego, warszawskiego i szczecińskiego (Czapowski, 2006), reprezentowane przede wszystkim przez formacje piaskowcowe. Struktury solankowe przydatne do lokalizacji obiektów podziemnych w Polsce szczegółowo opisano w części I poradnika – rozdz. 6.1.2.

2.3. FORMACJE SKALNE SŁABOPRZEPUSZCZALNE

Magazynowanie substancji lub składowanie odpadów w formacjach skalnych słaboprzepuszczalnych może odbywać się przez wykorzystanie sztucznie wykonanych pustek lub (rzadziej) pustek naturalnych istniejących w górotworze.

Są to formacje:
– krystaliczne;
– ilaste;
– solne.

Skały krystaliczne są korzystnym zbiornikiem ze względu na wysoką wytrzymałość mechaniczną, niską porowatość i dobrą odporność chemiczną (Ślizowski K. i in., 2004). Jednak, żeby formacja ta była brana pod uwagę, musi charakteryzować się rozległością i jednorodnością masywu oraz brakiem stref uskokowych i stref spękanych, które mogłyby być potencjalnie zawodnione. W Polsce są to formacje mało perspektywiczne z uwagi na fakt, że występują bardzo głęboko (krystalinik platformy prekambryjskiej) lub na obszarach objętych ochroną i silnie zaangażowanych tektonicznie (obszar Tatr), lub silnie zuskokowanych i aktywnych sejsmicznie (obszar sudecki). Dość powszechnie są wykorzystywane w Szwecji, w postaci specjalnie wydrążonych komór w skałach magmowych oraz umocnionych ścianach (ang. *lined rock caverns*) (Siemek, Nagy, 2007).

Skały ilaste (iły, łupki ilaste) są praktycznie nieprzepuszczalne i wykazują właściwości reologiczne. Preferowana głębokość dla magazynowania lub składowania w formacjach ilastych to 200–500 m p.p.t. (Ślizowski K. i in., 2004). Warunkiem zlokalizowania obiektu podziemnego w obrębie formacji ilastej jest brak przejawów tektoniki i spękań. W Polsce istnieją formacje wstępnie spełniające te kryteria, wymagają one jednak szczegółowego, czasochłonnego i drogiego programu badawczego. Są to przede wszystkim formacje ilaste triasu górnego i jury dolnej na monoklinie przedsudeckiej, analizowane przede wszystkim pod kątem możliwości składowania w nich odpadów niebezpiecznych i promieniotwórczych.

Formacje solne są sprawdzonymi strukturami do bezpiecznego magazynowania substancji lub składowania odpadów. Często, zarówno na świecie, jak i w Polsce, wykorzystuje się je jako podziemne magazyny gazu, ropy i paliw płynnych, a także jako składowiska odpadów w postaci stałej, ciekłej lub gazowej. Można w nich magazynować również wodór i powietrze. W strukturach solnych podziemne magazyny lub składowiska są formowane sztucznie, np. jako wyrobiska górnicze po eksploatacji soli albo wyługowane specjalnie do tego celu kawerny. Do lokalizacji obiektów podziemnych wykorzystywane są formacje solne powstałe we wszystkich erach i okresach geologicznych. Występują one na wszystkich kontynentach i należą do jednych z najliczniej występujących kopalin (Warren, 2006; Belenitskaya, 2019). Sole wykazują właściwości reologiczne, tj. dużą skłonność do pełzania w warunkach niskiego ciśnienia i temperatury, dzięki czemu stają się plastyczne, co ułatwia zamykanie ewentualnych spękań czy porów w skale, gwarantując wysoką szczelność wykonanych w niej wyrobisk. Szczególnie podatne na ten proces są chlorkowe sole potasowo-magnezowe. Wysokie przewodnictwo cieplne soli umożliwia odprowadzenie ciepła zakumulowanego w wyrobiskach w głąb górotworu. Wysoka rozpuszczalność – skrajna, w przypadku chlorkowych soli potasowo-magnezowych – pozwala na wykonywanie kawern solnych przez ich ługowanie rozcieńczoną solanką, tłoczoną otworami wiertniczymi z powierzchni. Warunkiem funkcjonowania obiektów podziemnych w strukturach solnych jest rodzaj zatłaczanego medium: media gazowe (gaz ziemny, wodór czy powietrze) i ciekłe (np. ropa naftowa, paliwa) muszą być pozbawione składników (np. wody) mogących reagować chemicznie lub biochemicznie z solą. Z końcem 2016 r. na świecie funkcjonowały 672 kawerny magazynowe, przechowujące 424 mld m^3 gazu (12% ówczesnego światowego zużycia – https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/salt-cavern). W tej formie magazynowania gazu przodują dwa kraje: Stany Zjednoczone Ameryki (392 kawerny) i Kanada (62 kawerny). W Europie zlokalizowanych jest łącznie 143 kawerny. W 2017 r. na świecie funkcjonowało pięć kawernowych magazynów czystego wodoru – trzy w Wielkiej Brytanii i dwa w Stanach Zjednoczonych (Tarkowski, Czapowski, 2018). W Polsce w ostatnim

10-leciu podjęto prace studialne w tym kierunku (np. Kaliski, Sikora, 2013; Kunstman, Urbańczyk, 2013; Chromik, 2015, 2016; Tarkowski, 2017; Czapowski, Tarkowski, 2018; Czapowski, 2019).

Do składowania takich mediów jak toksyczne odpady stałe i ciekłe oraz gazy (np. dwutlenek węgla), w utworach solnych wykorzystuje się także wyrobiska podziemnych kopalń (media stałe) i kawerny solne (ciecze i gazy). Podobnie jak w przypadku magazynowania substancji i składowania odpadów umieszczanych w tych przestrzeniach, nie mogą one reagować chemicznie z górotworem solnym lub muszą być składowane w odpowiednich opakowaniach. Czasem odpady stałe służą do podsadzania wyeksploatowanych wyrobisk w podziemnych kopalniach soli, np. w kopalniach Herfe-Neurode, Heilbronn i Glückauf Sonderhausen (Barchański, 1994; Marx i in., 2000; Poborska-Młynarska, 2000; Grzybowski, 2001; Barchański, 2003) oraz w kopalniach w wysadach solnych, np. Asse, Morsleben i Gorleben (Herrmann, Knipping, 1993; Bornemann, Bräuer, 1999; Brewitz i in., 2008) w Niemczech. Odpady ciekłe z eksploatacji piasków bitumicznych w prowincji Alberta w Kanadzie zatłacza się do kawern solnych wyługowanych w pokładach soli kamiennych w obrębie dewońskich formacji Lotsberg i Prairie (Kukiałka, 2014, 2015). Najczęściej spotykane struktury w obrębie formacji solnych to pokłady, poduszki i wysady solne (rys. 5). Na obszarze Polski formacje solne występują w utworach górnego permu (cechsztynu), triasu i miocenu. Złoża pokładowe cechsztynu, potencjalnie nadające się na podziemne magazyny i składowiska, znajdują się w rejonie Zatoki Puckiej, gdzie istnieje już podziemny kawernowy magazyn gazu Kosakowo w złożu Mechelinki, oraz na obszarze monokliny przedsudeckiej w rejonie Bytomia Odrzańskiego. Perspektywicznymi miejscami ulokowania takich obiektów są także wysady solne, np.: Damasławek, Rogóźno, Lubień, Łanięta, Goleniów i Izbica Kujawska, natomiast w wysadach Góra i Mogilno funkcjonują odpowiednio podziemny kawernowy magazyn paliw i magazyn gazu (Czapowski, 2006). Struktury solne przydatne do lokalizowania obiektów podziemnych w Polsce opisano w części I poradnika – rozdz. 6.1.3. W Polsce (wg stanu na 2022 r.) trzy obiekty podziemne (z 12 czynnych) znajdują się w strukturach solnych.

Słaboprzepuszczalne formacje geologiczne są najczęściej rozpatrywane pod kątem lokalizacji składowisk odpadów niebezpiecznych oraz promieniotwórczych (nieobjętych poradnikiem).

2.4. FORMACJE ZŁÓŻ WĘGLA KAMIENNEGO

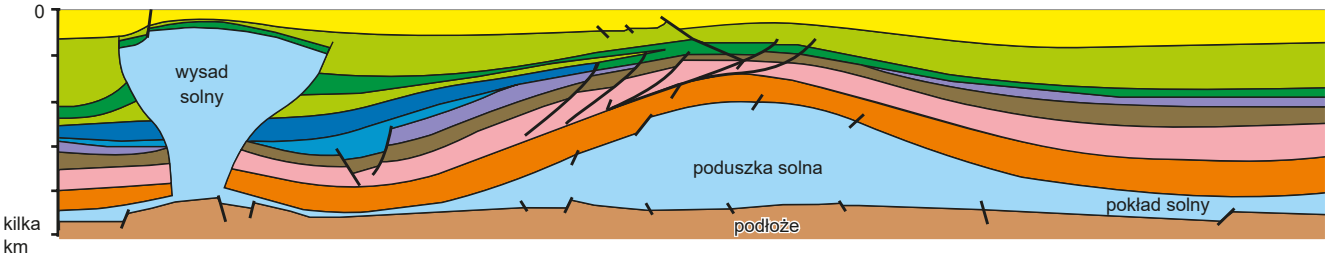
Magazynowanie/składowanie w formacjach złóż węgla kamiennego odbywa się w dwóch wariantach:

- składowania dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia metanu, w nieeksploatowanych pokładach węgla kamiennego (CO_2-ECBMR);
- magazynowania lub składowania w wyeksploatowanych kopalniach węgla.

Lokalizowanie obiektu w nieeksploatowanych złożach węgla kamiennego dotyczy w szczególności pokładów węglowych zalegających głęboko, których podziemne wydobycie jest nieopłacalne. Na świecie są rozpatrywane te złoża, z których metan jest wydobywany metodą otworową, przy jednoczesnym zatłaczaniu CO_2 (CO_2-ECBMR). Metoda ta polega na wykorzystywaniu właściwości adsorpcyjnych złoża przez zastępowanie cząsteczek metanu cząsteczkami CO_2. Badania laboratoryjne wskazują, że CO_2 dobrze penetruje strukturę porowatą węgla ze względu na niewielkie rozmiary cząsteczki oraz niską energię aktywacji, przy czym duże znaczenie ma metanonośność pokładów oraz parametry petrofizyczne węgla (Jureczka i in., 2012). Wolny dwutlenek węgla skupia się w makroporach, a jego ilość zależy od objętości, ciśnienia i temperatury (Krzemień i in., 2015). Metoda ta nie jest wystarczająco rozpoznana, na świecie zrealizowano kilka projektów pilotażowych, w tym jeden w Polsce. Dolnośląskie Zagłębie Węglowe i Lubelskie Zagłębie Węglowe określono jako nieodpowiednie do składowania CO_2 z uwagi na zagadnienia bezpieczeństwa lub stopień udokumentowania zasobów metanu pokładów węgla (Wójcicki i in., 2013). W Polsce możliwość zatłaczania CO_2 z jednoczesnym wspomaganiem wydobycia metanu rozpatrywano na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (projekt RECOPOL w Kaniowie w pokładach karbonu).

Druga możliwość magazynowania lub składowania w formacjach złóż węgla kamiennego to umieszczenie obiektu podziemnego w wyeksploatowanych kopalniach węgla. Takie magazyny funkcjonują np. w Stanach Zjednoczonych Ameryki oraz w Europie w Belgii. Doświadczenia światowe wskazują na trzy zasadnicze kryteria wyboru wyeksploatowanej kopalni węgla kamiennego na podziemny magazyn (Siemek, Nagy, 2007):

- znaczna odległość od czynnych kopalń;
- szczelne przykrycie zbiornika warstwami nieprzepuszczalnymi;



Rys. 5. Podstawowe typy struktur solnych (Letcher, 2016; zmienione)

– korzystne warunki hydrogeologiczne.

Strukturę można uznać za odpowiednią do lokalizacji magazynu lub składowiska, gdy charakteryzuje się także (Kidybiński, Siemek, 2006):

– niewielkim stopniem spękania górotworu;
– korzystnym ułożeniem warstw;
– dopuszczalnym stopniem naruszenia górotworu na skutek eksploatacji;
– dużą spodziewaną pojemnością zbiornika (łącznie gazu w pustkach pogórniczych oraz gazu zaadsorbowanego przez pozostały w kopalni węgiel).

W Polsce był tylko jeden projekt (Podziemny Magazyn Gazu Nowa Ruda), który brał pod uwagę tego typu magazyn. Z uwagi jednak na brak ciągłej izolacji, a tym samym ograniczenia techniczno-ekonomiczne, projekt został zaniechany.

3. RODZAJE PODZIEMNYCH BEZZBIORNIKOWYCH MAGAZYNÓW SUBSTANCJI I PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

3.1. PODZIAŁ PODZIEMNYCH BEZZBIORNIKOWYCH MAGAZYNÓW SUBSTANCJI I PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

W literaturze istnieje wiele rodzajów podziemnych obiektów bezzbiornikowego magazynowania substancji i składowania odpadów. Podziały bazują na różnorodnych kryteriach, jak np. rodzaj struktury, charakter formacji skalnej, rodzaj wyrobiska podziemnego, czy rodzaj odpadów lub magazynowanego medium.

W poradniku zaproponowano autorski podział obiektów podziemnych, który przedstawiono na rysunku 6. Podział jest oparty na kryterium naturalnego lub antropogenicznego utworzenia zbiornika w górotworze oraz na kryterium charakteru struktury przestrzeni zbiornikowej.

Zgodnie z zaproponowaną klasyfikacją, obiekty podziemne podzielono na:

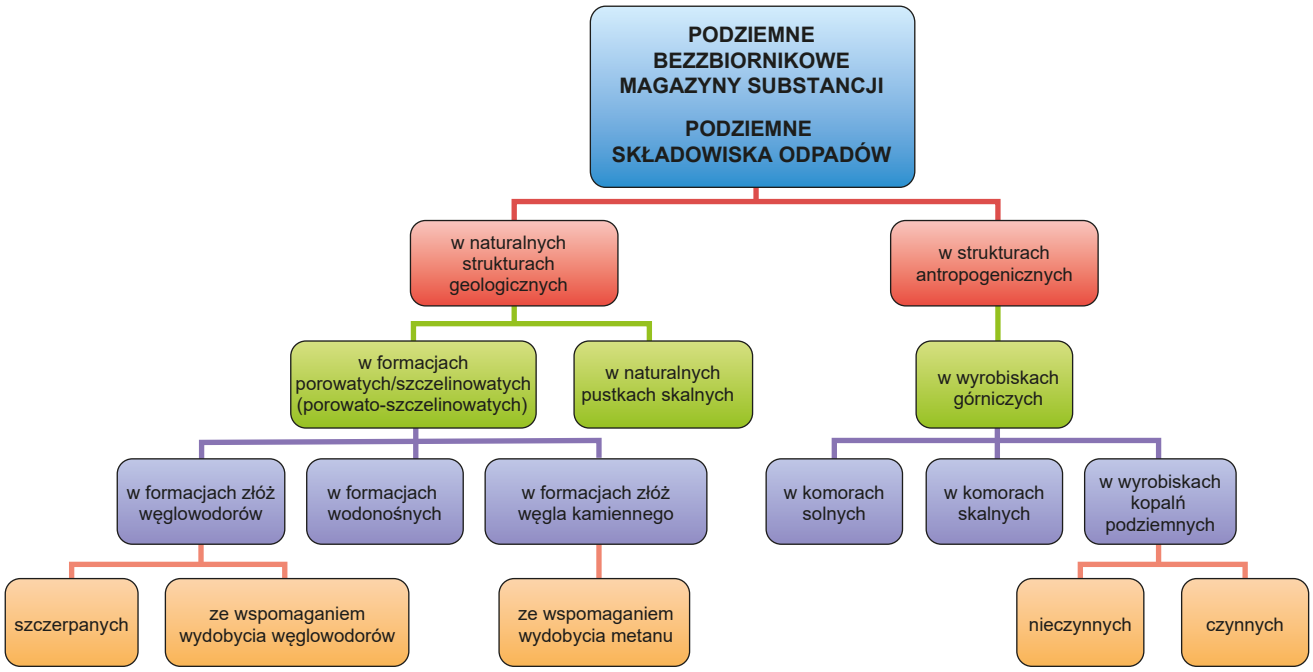
– podziemne bezzbiornikowe magazyny substancji i podziemne składowiska odpadów **w naturalnych strukturach geologicznych**;
– podziemne bezzbiornikowe magazyny substancji i podziemne składowiska odpadów **w strukturach antropogenicznych**.

Ten główny podział dotyczy przestrzeni zbiornikowej wykorzystywanej w górotworze do magazynowania lub składowania. Zależnie od klasyfikacji tworzą ją pory, szczeliny, naturalne lub sztuczne pustki wykonane w górotworze. Według tego kryterium obiekty podziemne w strukturach naturalnych podzielono na (rys. 7):

– podziemne obiekty **w formacjach porowatych/szczelinowatych** (porowato-szczelinowatych), w obrębie których, z uwagi na strukturę geologiczną, wydzielono obiekty podziemne:
  - w formacjach złóż węglowodorów,
  - w formacjach wodonośnych,
  - w formacjach złóż węgla kamiennego;
– podziemne obiekty w **naturalnych pustkach skalnych**.

Natomiast podziemne obiekty **w strukturach antropogenicznych** podzielono na wyrobiska górnicze, w obrębie których rozróżniono obiekty podziemne:

– w komorach solnych (kawernach);



Rys. 6. Rodzaje podziemnych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów

– w komorach skalnych (innych niż solne);
– w wyrobiskach kopalń podziemnych.

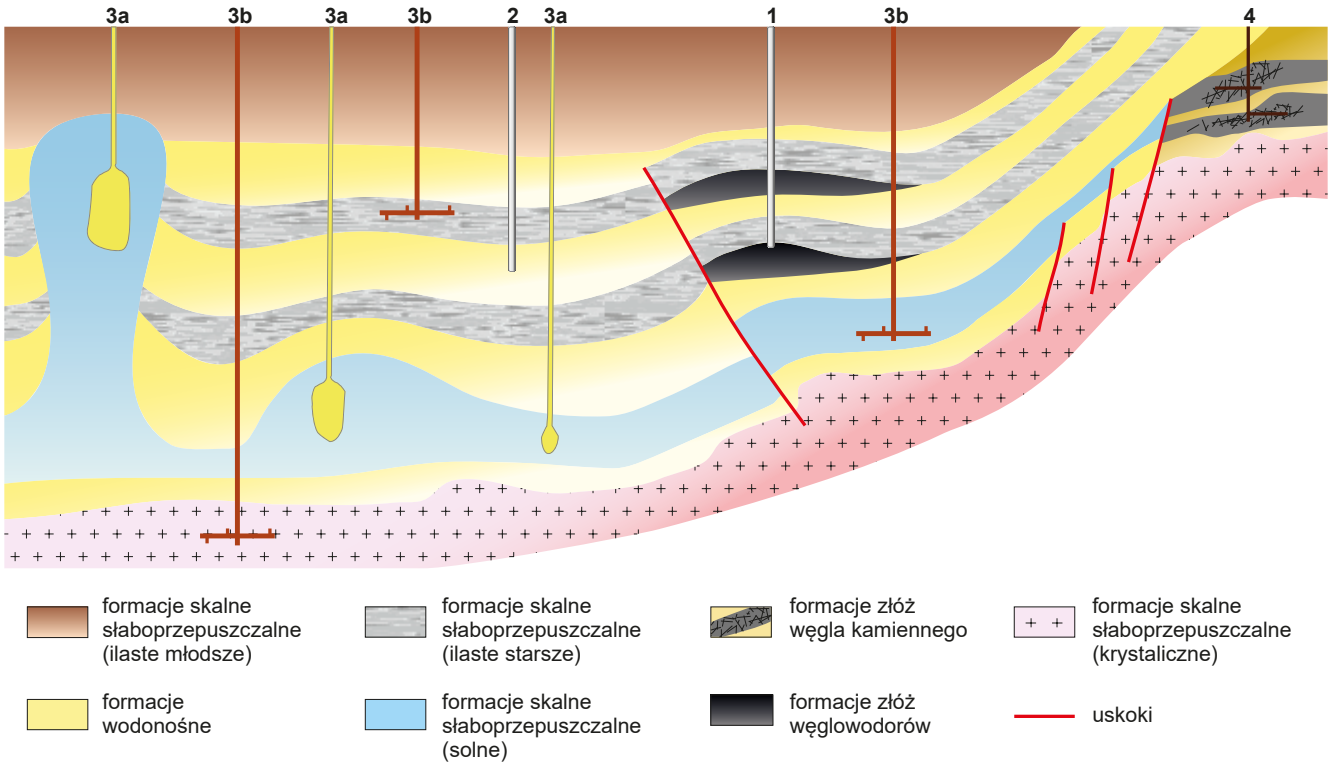
Dalszy podział obiektów podziemnych wynika ze sposobu zagospodarowania górotworu w przeszłości (rys. 8) – nie uwzględnia on obiektów w górotworze nienaruszonym. W związku z tym wyróżniono obiekty podziemne:
– w formacjach sczerpanych złóż węglowodorów;
– w formacjach złóż węglowodorów ze wspomaganiem ich wydobycia;
– w formacjach złóż węgla kamiennego ze wspomaganiem wydobycia metanu;
– w czynnych wyrobiskach kopalń podziemnych;
– w nieczynnych wyrobiskach kopalń podziemnych.

Dla porównania poniżej przedstawiono inne podziały obiektów podziemnych opisywane w literaturze.

Przykładem podziału podziemnych magazynów gazu może być podział zamieszczony w normie PN-EN 1918, który dotyczy tylko podziemnych magazynów gazu i dzieli je na (rys. 9):
– podziemne magazyny gazu w ośrodkach porowatych (ang. *pore storage*), w tym:
  • magazyny w warstwach wodonośnych (ang. *storage in aquifers*);
  • magazyny w wyeksploatowanych warstwach gazonośnych (ang. st*orage in former gas fields*);
  • magazyny w wyeksploatowanych warstwach roponośnych (ang. *storage in former oil fields*);
– podziemne magazyny gazu w kawernach (ang. *caverns*), w tym:
  • magazyny w kawernach solnych (w wyługowanych komorach solnych) (ang. *storage in salt caverns*),
  • magazyny w kawernach skalnych (w górniczych kawernach skalnych) (ang. *storage in rock caverns*) wraz z kawernami obudowanymi (ang. *lined rock caverns*),
  • magazyny w zlikwidowanych kopalniach (ang. *storage in abandoned mines*).

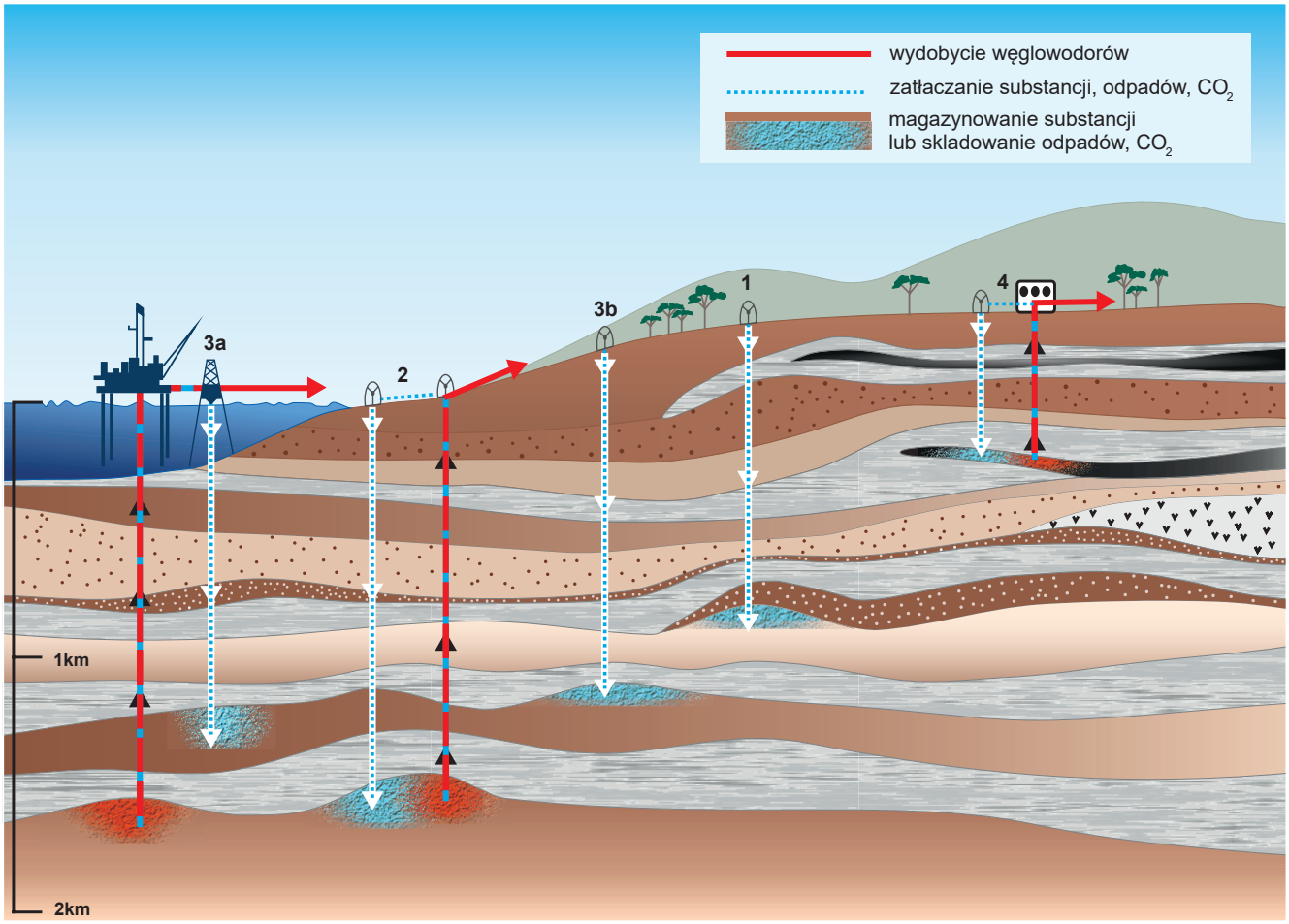
Podział ten jest powszechnie stosowany w przypadku budowy podziemnych bezzbiornikowych magazynów gazu i nawiązuje do zaproponowanego w niniejszej publikacji.

W poradniku zaprezentowano także podział obiektów podziemnych ze względu na głębokość ich występowania pod powierzchnią terenu (p.p.t.) lub dnem morza (p.p.d.), w którym wyróżniono (rys. 10):
– płytkie podziemne magazyny substancji i składowiska odpadów, zlokalizowane w zakresie głębokości do 200 m p.p.t./p.p.d. (ang. *shallow geological storage*, *shallow geological disposal*, *shallow geological repository*, *shallow geological facility*);
– głębokie podziemne magazyny substancji i składowiska odpadów, zlokalizowane w zakresie głębokości >200 m p.p.t./p.p.d. do 1000 m p.p.t./p.p.d. (ang. *deep geological storage*, *deep geological disposal*, *deep geological repository*, *deep geological facility*);



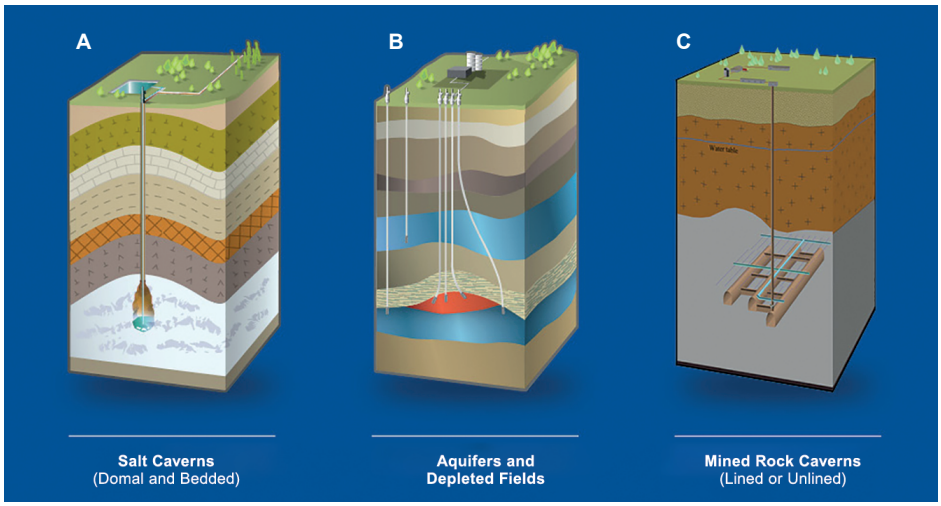
Rys. 7. Rodzaje obiektów podziemnych na tle struktur geologicznych i formacji perspektywicznych dla magazynowania i składowania

1 – obiekty podziemne w formacjach złóż węglowodorów, **2** – obiekty podziemne w formacjach wodonośnych, **3a** – obiekty podziemne w komorach solnych, **3b** – obiekty podziemne w komorach skalnych i wyrobiskach kopalń podziemnych, **4** – obiekty podziemne w formacjach złóż węgla kamiennego



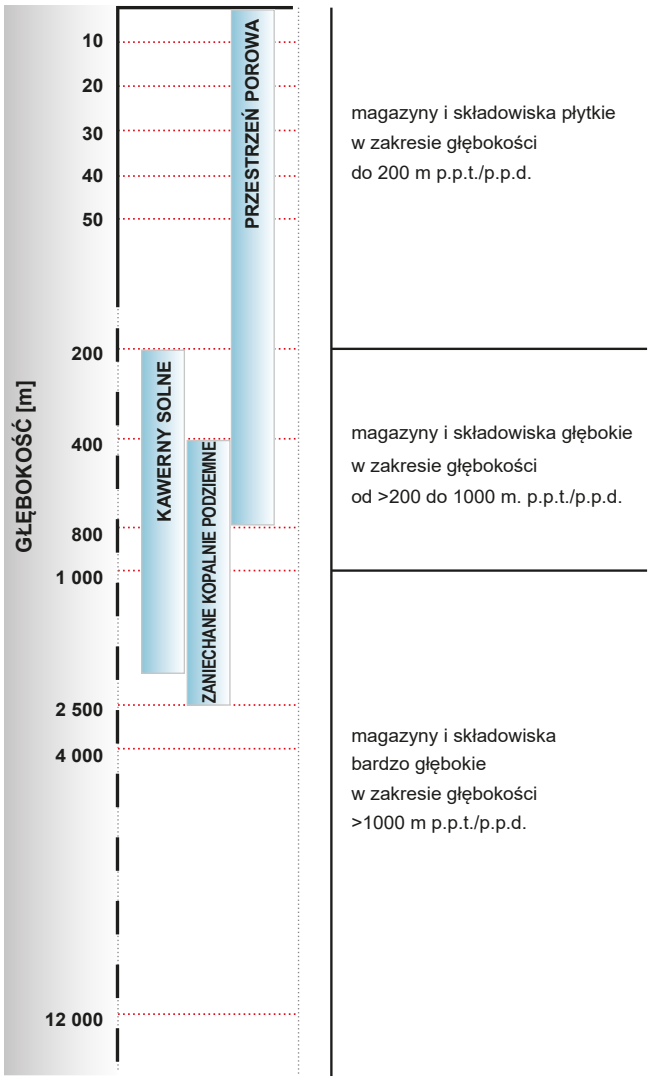
Rys. 8. Możliwości lokalizacji i rodzaje magazynów/składowisk w formacjach porowatych/szczelinowatych (IPCC, 2005 za Cook, 1999, zmienione)

1 – magazynowanie substancji lub składowanie odpadów, CO_2 w formacjach złóż węglowodorów; **2** – magazynowanie substancji lub składowanie CO_2 w formacjach złóż węglowodorów ze wspomaganiem ich wydobycia; **3** – magazynowanie substancji lub składowanie odpadów, CO_2 w formacjach wodonośnych: **a)** na morzu (*offshore*), **b)** na lądzie (*onshore*); **4** – magazynowanie substancji lub składowanie CO_2 w formacjach złóż węgla kamiennego ze wspomaganiem wydobycia metanu



Rys. 9. Rodzaje magazynów gazu ziemnego wg propozycji normy PN-EN 1918 (https://www.geostocksandia.com/geostock-sandia/expertise/)

A – magazyny gazu w kawernach solnych (wg poradnika w komorach solnych), **B** – magazyny w warstwach wodonośnych (wg poradnika w formacjach wodonośnych) lub w wyeksploatowanych warstwach gazonośnych (wg poradnika w formacjach złóż węglowodorów), **C** – magazyny w kawernach skalnych (wg poradnika w komorach skalnych) lub w zlikwidowanych kopalniach (wg poradnika w wyrobiskach kopalń podziemnych)



Rys. 10. Podział podziemnych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów ze względu na głębokość występowania

p.p.t. – pod powierzchnią terenu; p.p.d. – pod powierzchnią dna

– bardzo głębokie podziemne magazyny substancji i składowiska odpadów, zlokalizowane w zakresie głębokości >1000 m p.p.t./p.p.d. (ang. *very deep geological storage*, *very deep geological disposal*, *very deep geological repository*, *very deep geological facility*).

Powyższy podział obiektów podziemnych jest istotny ze względów ekonomicznych, w tym ze względu na koszty badań geologicznych oraz rosnące wraz z głębokością koszty budowy i eksploatacji obiektów podziemnych.

Według Ślizowskiego K. i in. (2004) podziemne składowiska odpadów ze względu na rodzaj kopalń podziemnych podzielono na:

– podziemne składowiska odpadów w kopalniach węgla kamiennego;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach miedzi;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach cynku i ołowiu;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach soli;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach anhydrytu;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach barytu;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach glin białowypalających się;
– podziemne składowiska odpadów w kopalniach rud żelaza.

Ślizowski K. i in. (2004) podał także podział podziemnych składowisk odpadów, ze względu na rodzaj skał, w których zlokalizowany jest obiekt:

– podziemne składowiska odpadów w skałach krystalicznych;
– podziemne składowiska odpadów w skałach ilastych;
– podziemne składowiska odpadów w złożach soli.

W ustawie pgg zastosowano podział podziemnych składowisk odpadów w zależności od rodzaju odpadów:

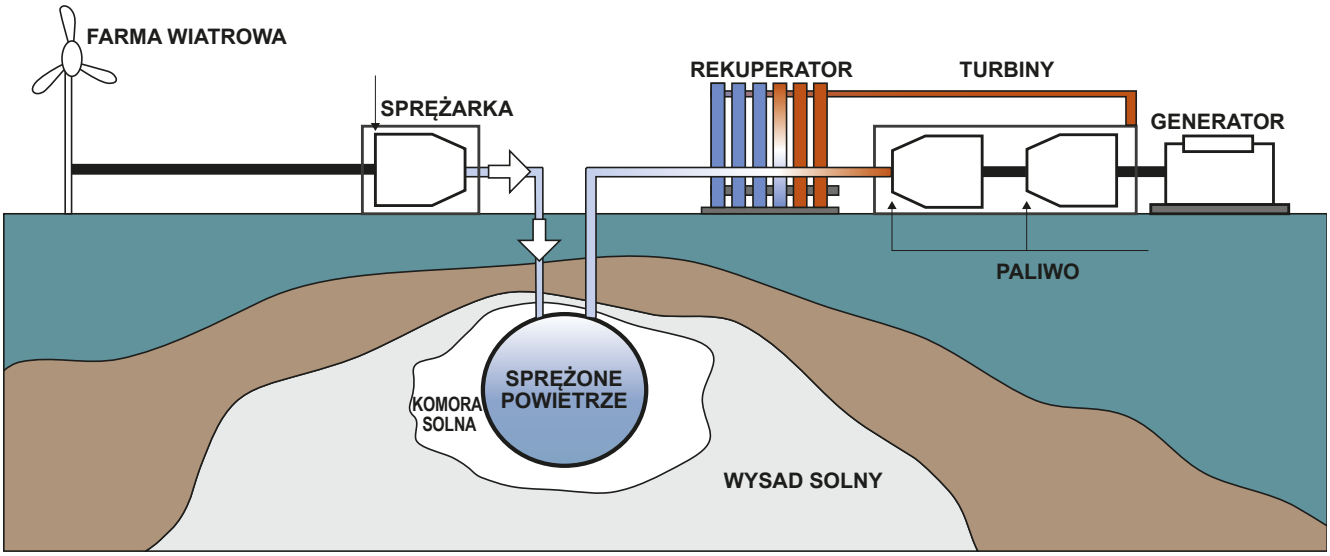
– podziemne składowiska odpadów niebezpiecznych;
– podziemne składowiska odpadów obojętnych;
– podziemne składowiska odpadów promieniotwórczych (nieobjęte opracowaniem);
– podziemne składowiska odpadów innych niż niebezpieczne, obojętne i promieniotwórcze.

Matos i in. (2019) zaproponowali podział podziemnych magazynów ze względu na rodzaj skały, w których są lokalizowane, wydzielając:

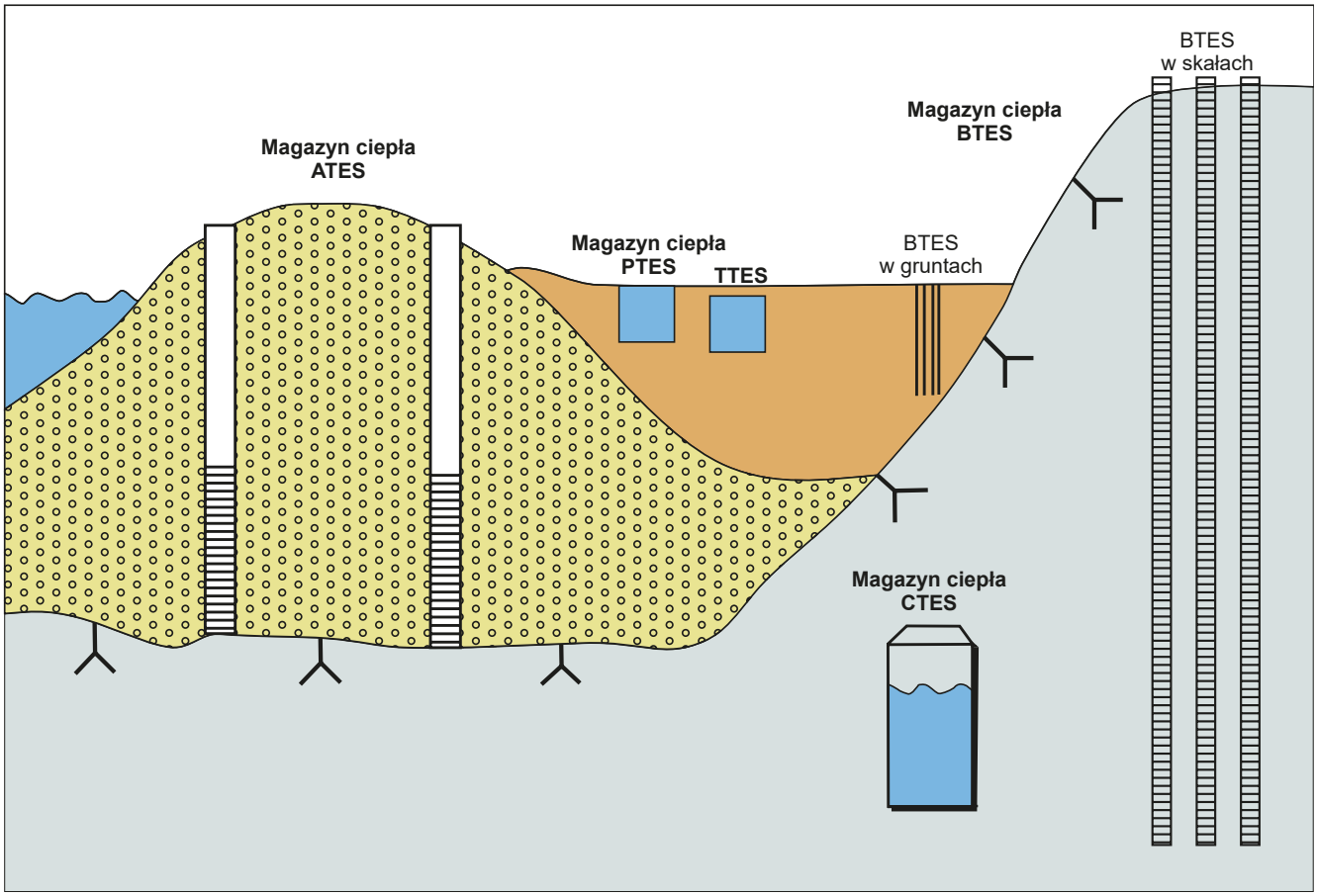
– podziemne magazyny substancji w skałach magmowych;
– podziemne magazyny substancji w skałach osadowych;
– podziemne magazyny substancji w skałach metamorficznych.

Z kolei z uwagi na potrzebę magazynowania energii w górotworze, w literaturze (Lee, 2013; Miecznik, 2016; Matos i in., 2019; Menéndez i in., 2019; Żeruń i in., 2022) opisano następujące rodzaje magazynów:

– podziemne magazyny energii (UES – *underground energy storage*):
  - podziemne magazyny gazu (UGS – *underground gas storage*),
  - podziemne magazyny ropy naftowej i paliw (UOFS – *underground oil and fuel storage*),
  - podziemne magazyny wodoru (UHS – *underground hydrogen storage*),
  - magazyny sprężonego powietrza (CASE – *compressed air energy storage*) (rys. 11);
– podziemne magazyny energii cieplnej (UTES – *underground thermal energy storage*) (nieujęte w opracowaniu) (Lee, 2013; Matos i in., 2019):
  - magazyny energii cieplnej w warstwie wodonośnej (magazyn otwarty) (ATES – *aquifer thermal energy storage*) (rys. 12),
  - magazyny energii cieplnej w kawernach lub w wyrobiskach górniczych (CTES – *cavity thermal*



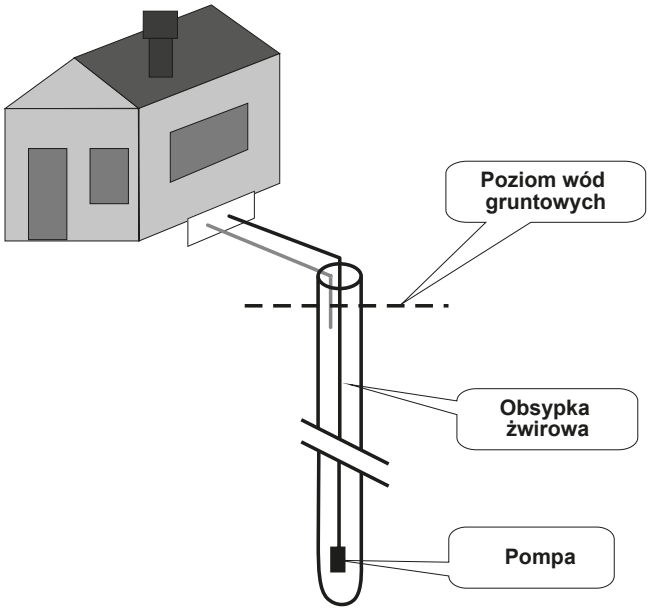
Rys. 11. Podziemny magazyn sprężonego powietrza w kawernie solnej (UHS – *underground hydrogen storage*) (Matos i in., 2019)



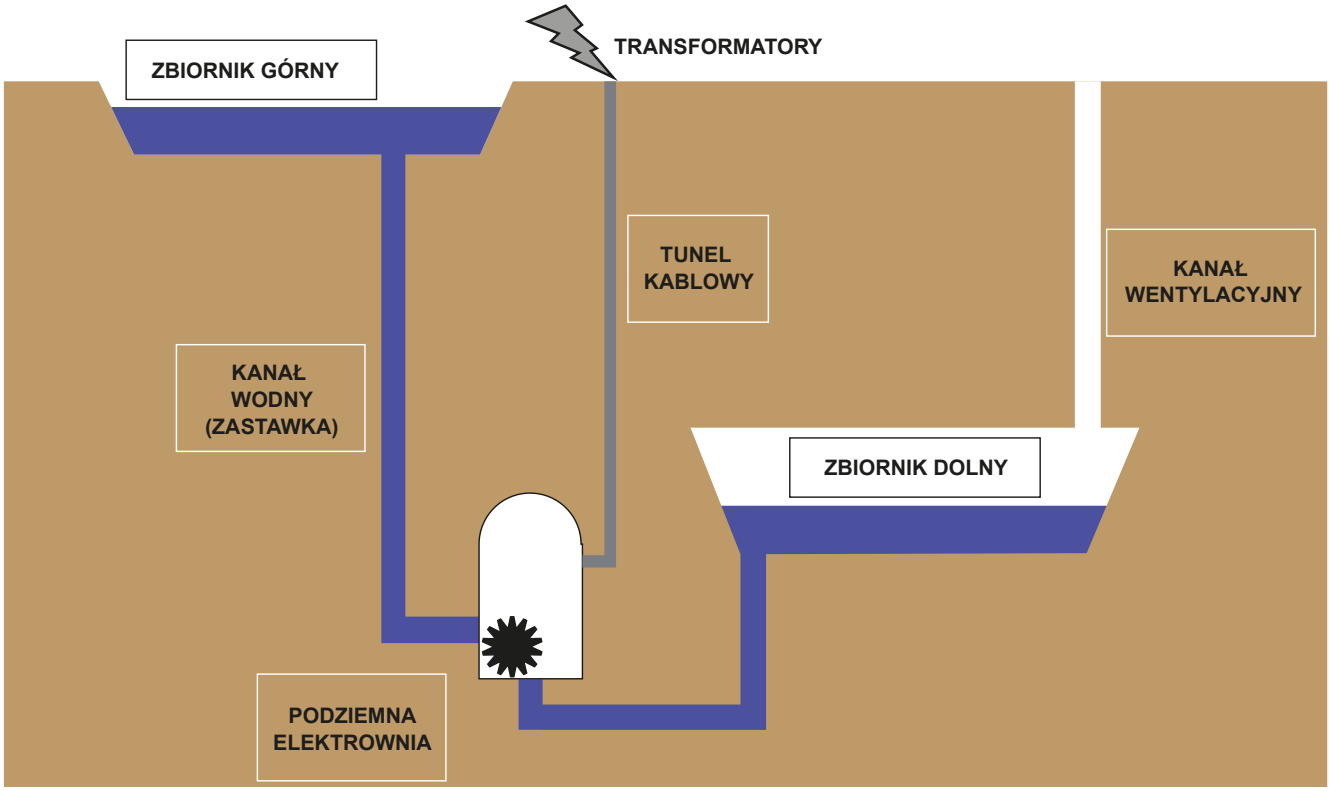
Rys. 12. Rodzaje podziemnych magazynów energii cieplnej (UTES – *underground thermal energy storage*) (Matos i in., 2019, zmienione)

energy storage; MWTS – *mine water thermal storage*) (rys. 12),
- magazyny energii cieplnej w otworze studziennym (SCW – *standing column well*) (rys. 13),
- magazyny energii cieplnej w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych (TTES – *Tank thermal energy storage*) (rys. 12),
- magazyny energii cieplnej w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych (PTES – *pit thermal energy storage*) (rys. 12),
- podziemne magazyny szczytowo-pompowe (UPHS – *underground pumped hydro storage*) (rys. 14),
- otworowe magazyny energii cieplnej (BTES – *borehole thermal energy storage*) (rys. 12),
- fundamenty energetyczne (EF – *energy foundation*), np.: termopłyty, termościany, termoobudowy, termopale (rys. 15).

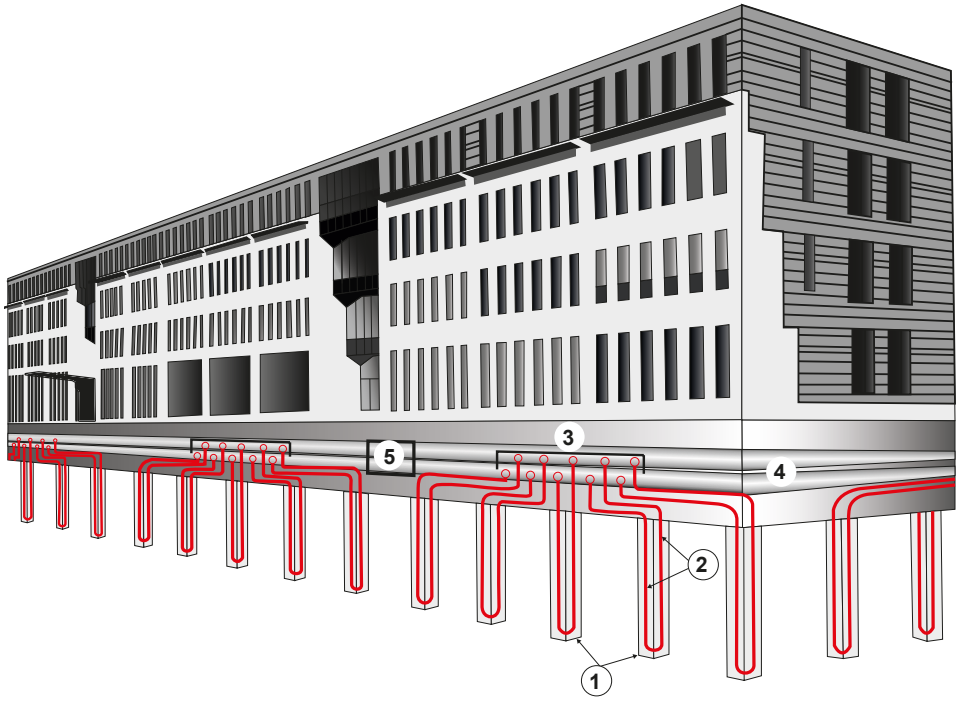
W podziale wyróżniono tzw. fundamenty energetyczne, które w ostatnich latach stają się coraz bardziej popularne na świecie jako preferowane systemy pozyskiwania oraz magazynowania energii cieplnej (Rychlewski i in., 2014; Ryżyński, Bogusz, 2016; Maca, 2016; Bogusz, 2017; Żeruń i in., 2022). Jest to związane z rosnącym zapotrzebowaniem na realizację strategicznych celów pakietu klimatyczno-energetycznego Unii Europejskiej, co sprzyja rozwojowi nowoczesnych odnawialnych źródeł energii, w tym systemów geotermalnych opartych na technologii fundamentów energetycznych, które pracują na zasadzie gruntowych pomp ciepła (gruntowych wymienników ciepła) oraz otworowych magazynów energii cieplnej.



Rys. 13. Magazyn energii cieplnej w otworze studziennym (Lee, 2013)



Rys. 14. Podziemny magazyn szczytowo-pompowy (UPHS – *underground pumped hydro storage*) (Matos i in., 2019)



Rys. 15. Przykład zastosowania fundamentów energetycznych tzw. termopali (H. Brandl – http://www.sloged.si/wp-content/uploads/zborniki%20sukljetovih%20dnevov/4/1.pdf)

1 – pale energetyczne (termopale); **2** – rury wymiennika; **3** – kolektory rur wymiennika; **4** – rura zbiorcza; **5 –** węzeł cieplny/chłodniczy

3.2. CHARAKTERYSTYKA PODZIEMNYCH BEZZBIORNIKOWYCH MAGAZYNÓW SUBSTANCJI I PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

Wybór lokalizacji obiektu podziemnego oraz technologii jego eksploatacji zależą przede wszystkim od rodzaju struktury/formacji geologicznej oraz właściwości geologicznych górotworu, które warunkują rodzaj możliwych substancji do magazynowania lub odpadów do składowania. W obiektach podziemnych zlokalizowanych w formacjach porowatych/szczelinowatych możliwe jest magazynowanie substancji lub składowanie odpadów tylko w stanie gazowym lub ciekłym. Natomiast w obiektach podziemnych wykorzystujących naturalne pustki lub wyrobiska górnicze możliwe jest magazynowanie substancji lub składowanie odpadów we wszystkich trzech stanach skupienia. Na podstawie doświadczeń krajowych w tabeli 1 zestawiono informacje dotyczące rodzaju substancji/odpadów, których magazynowanie i składowanie jest możliwe w danym rodzaju obiektu.

3.2.1. Charakterystyka podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów w naturalnych strukturach geologicznych

3.2.1.1. Obiekty w formacjach złóż węglowodorów

Jednymi z najpopularniejszych rodzajów obiektów podziemnego magazynowania i składowania są magazyny lub składowiska w formacjach złóż węglowodorów (Evans, 2007). Pierwsze eksperymentalne podziemne magazynowanie gazu w formacji złóż węglowodorów miało miejsce w 1915 r. w hrabstwie Welland w prowincji Ontario (Kanada) (Stamm, 1957; Lyndon, 1961; Evans, 2007). Z kolei pierwszy magazyn gazu, w sczerpanym złożu gazu, który nadal funkcjonuje, wybudowano w 1916 r. w Zoar koło Buffalo w stanie Nowy Jork (Stany Zjednoczone Ameryki) (Evans, 2007; Evans, Chadwick, 2009). Obecnie na świecie funkcjonuje wiele podziemnych obiektów w omawianych formacjach. Podziemne magazyny gazu (UGS) w formacjach złóż węglowodorów są pierwszym pod względem częstości występowania na świecie typem podziemnego magazynu (ipi.gasstoragepoland.pl).

Popularność obiektów podziemnych w formacjach złóż węglowodorów jest głównie związana z warunkami występowania złoża, gdyż zapewniona jest szczelność struktury geologicznej, a tym samym przydatność do skutecznego zatrzymywania substancji lub odpadów. Złoża węglowodorów oraz struktury geologiczne, w których te złoża się znajdują, są dobrze udokumentowane, zazwyczaj mają znaczną pojemność, a skały zbiornikowe charakteryzują się duża przepuszczalnością i dobrym przepływem w obrębie kolektora. Oprócz dobrego rozpoznania geologicznego, popularność magazynów i składowisk w tych formacjach wynika z możliwości wykorzystania istniejącej infrastruktury do transportu oraz zatłaczania substancji/odpadów, a w przypadku magazynu dodatkowo do odbioru substancji.

Obiekty podziemne w złożach węglowodorów lokalizuje się w strukturach węglowodorowych najczęściej w pułapkach węglowodorowych: tektonicznych, stratygraficznych, litologicznych (patrz: cz. I, rozdz. 2.1), ponieważ stwarzają

Tabela 1

Zestawienie rodzajów podziemnych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów wraz z informacją o możliwych rodzajach magazynowanych substancji lub składowanych odpadów uzupełnione o doświadczenia krajowe

Lp.	Rodzaj podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji oraz podziemnych składowisk odpadów				Możliwe rodzaje magazynowanych substancji lub składowanych odpadów*			Doświadczenia krajowe (patrz: rozdz. 6)
					podziemny bezzbiornikowy magazyn substancji	podziemne składowisko odpadów	podziemne składowisko CO_2	
1	Podziemne magazyny substancji i podziemne składowiska odpadów w strukturach naturalnych	w formacjach porowatych/szczelinowatych (porowato-szczelinowatych)	w formacjach złóż węglowodorów	w formacjach sczerpanych złóż węglowodorów	substancje stałe: NIE substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: NIE odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK	najczęściej występujące w kraju; pracujące magazyny: PMG Bonikowo, PMG Brzeźnica II, PMG Daszewo, PMG Husów, PMG Strachocina, PMG Swarzów, PMG Wierzchowice; pracujące składowiska: PSO Borzęcin, PSO Husów–Albigowa–Krasne; nieuruchomione (lub eksploatacja zaniechana), mające koncesje magazyny i składowiska: PMG Henrykowice, PSO Świdnik
				ze wspomaganiem wydobycia węglowodorów	substancje stałe: NIE substancje ciekłe: NIE substancje gazowe: NIE	odpady stałe: NIE odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK	brak doświadczeń w kraju
2			w formacjach wodonośnych	–	substancje stałe: NIE substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: NIE odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK	brak doświadczeń w kraju; planowane składowisko PS CO_2 Wojszyce – projekt zarzucony na etapie wstępnego rozpoznania; planowane magazyny: PMG Marianowo, PMG Kałuszyn, PMG Chabowo (podziemne magazyny gazu – projekty zarzucone na etapie rozpoznania lub koncepcji)
3			w formacjach złóż węgla kamiennego	ze wspomaganiem wydobycia metanu	substancje stałe: NIE substancje ciekłe: NIE substancje gazowe: NIE	odpady stałe: NIE odpady ciekłe: NIE odpady gazowe: NIE	TAK	projekt pilotażowy/badawczy – składowisko CO_2 w Kaniowie
4		w naturalnych pustkach skalnych		–	substancje stałe: TAK substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: TAK odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK/NIE (nieuzasadnione ekonomicznie)	brak doświadczeń w kraju
5	Podziemne magazyny substancji i podziemne składowiska odpadów w strukturach antropogenicznych	w wyrobiskach górniczych	w komorach solnych	–	substancje stałe: TAK substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: TAK odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK/NIE (nieuzasadnione ekonomicznie)	występujące w kraju; pracujące magazyny: KPMG Kosakowo, KPMG Mogilno, PMRiP Góra; planowane magazyny: KPMG Damasławek, Goleniów; planowane studium wykonalności: PSO Mogilno
6			w komorach skalnych	–	substancje stałe: TAK substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: TAK odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK/NIE (nieuzasadnione ekonomicznie)	brak doświadczeń w kraju
7			w wyrobiskach kopalń podziemnych	nieczynnych	substancje stałe: TAK substancje ciekłe: TAK substancje gazowe: TAK	odpady stałe: TAK odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	TAK/NIE (nieuzasadnione ekonomicznie)	planowany magazyn PMG Nowa Ruda (przedsięwzięcie zaniechane z powodów techniczno-ekonomicznych)
				czynnych	substancje stałe: NIE substancje ciekłe: NIE substancje gazowe: NIE	odpady stałe: TAK odpady ciekłe: TAK odpady gazowe: TAK	NIE	brak doświadczeń w kraju; rozważane składowisko w Kopalni Soli Kłodawa

*podane w tabeli rodzaje odpadów i składowisk nie uwzględniają szczegółowych wymagań wynikających z przepisów prawa

najlepsze warunki do podziemnego magazynowania lub składowania. Obiekty podziemne w złożach węglowodorów są lokalizowane w ośrodkach porowatych/szczelinowatych (skałach zbiornikowych).

W złożach tych, przepływ i gromadzenie gazów/cieczy zachodzi w przestrzeni porowej lub w sieci szczelin. Porowatość/szczelinowatość oraz przepuszczalność skał górotworu jest warunkiem wtłaczania i odbioru substancji/odpadów w skale zbiornikowej. Przygotowując proces przekształcania złoża w magazyn lub składowisko należy mieć na uwadze, że podczas wydobywania węglowodorów ze złoża w przestrzeni porowej/szczelinowej, w zależności od budowy geologicznej i jednorodności skały zbiornikowej, mogą zachodzić następujące procesy (Ślizowski K., 1998; Evans, 2007):

– w przypadku, gdy skała zbiornikowa jest sucha i nie ma kontaktu z sąsiadującymi warstwami wodonośnymi – nie ma dopływu wód do złoża z sąsiadujących warstw, jej przestrzeń porowa (szczeliny) pozostaje wypełniona węglowodorami, których ciśnienie w zbiorniku spada wraz z wydobyciem;
– w przypadku, gdy skała zbiornikowa ma kontakt z sąsiadującymi warstwami wodonośnymi (otaczającymi lub podścielającymi) – ma miejsce wnikanie wody w jej przestrzeń porową (szczeliny), głównie z powodu gradientów hydrodynamicznych i przemieszczania do otworów wydobywczych. W efekcie ciśnienie złożowe w zbiorniku podlega zmianom i staje się zbliżone do hydrostatycznego.

Z uwagi na opisane procesy zachodzące w złożu, należy wybrać optymalny moment zakończenia eksploatacji, żeby znacznie skrócić okres budowy obiektu podziemnego i zmniejszyć nakłady inwestycyjne (nie dotyczy obiektów podziemnych ze wspomaganiem wydobycia węglowodorów).

W wyniku zatłaczania substancji/odpadów do obiektu podziemnego w zbiorniku następuje wzrost ciśnienia złożowego, przemieszczanie węglowodorów i w większości przypadków wypieranie wód złożowych, które przeniknęły do zbiornika w trakcie lub po zakończeniu eksploatacji złoża, co powoduje odbudowywanie pojemności buforowej (Kaliski i in., 2010). W wielu przypadkach ponowne wtłaczanie medium i wzrost ciśnienia w złożu może prowadzić do wspomagania i zwiększenia wydobycia węglowodorów (Evans, 2007). Zalecenia funkcjonalne dotyczące projektowania, budowy i eksploatacji podziemnych magazynów gazu w formacjach złóż węglowodorów zostały szczegółowo opisane w normie PN-EN 1918-2.

W przypadku magazynów, podczas kolejnych cykli zatłaczania, ich pojemność porowa/szczelinowa i tym samym ich pojemność czynna zwiększa się, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej przy określonym ciśnieniu roboczym. W przypadku składowisk, ma miejsce tylko jednorazowe zatłaczanie medium do struktury, aż do momentu osiągnięcia ciśnienia złożowego lub ciśnienia nieco większego.

Zalety i wady podziemnych obiektów w formacjach złóż węglowodorów zestawiono w tabeli 2.

Z uwagi na właściwości formacji złóż węglowodorów, można w nich magazynować tylko substancje w stanie ciekłym i gazowym, np. ropę naftową, gaz LNG lub LPG, inne paliwa płynne, wodór oraz sprężone powietrze (patrz: tab. 30 str. 111).

W podziemnych składowiskach odpadów w omawianych złożach mogą być składowane tylko wybrane odpady w stanie ciekłym i gazowym oraz CO_2. Głównie składuje się odpady związane z wydobyciem i produkcją węglowodorów (patrz: tab. 30 str. 111) (Ślizowski K., 1998). Składowanie CO_2 i niektórych odpadów może odbywać się jednocześnie z prowadzoną eksploatacją złoża węglowodorów, zapewniając w ten sposób wspomaganie ich wydobycia.

Tabela 2

Zalety i wady obiektów podziemnych w formacjach złóż węglowodorów (https:// ipi.gasstoragepoland.pl)

Rodzaj obiektu podziemnego / Cechy obiektu podziemnego	Podziemny magazyn substancji w formacjach złóż węglowodorów	Podziemne składowisko odpadów w formacjach złóż węglowodorów
Zalety	• dobrze rozpoznana budowa geologiczna złoża (badania sejsmiczne, rdzenie wiertnicze z wykonanych otworów, inne badania geofizyczne, historia wydobycia gazu ziemnego lub ropy naftowej) • zapewniona szczelność geologiczna • możliwość wykorzystania do eksploatacji istniejących otworów wiertniczych • istnienie infrastruktury naziemnej • zazwyczaj połączone z infrastrukturą przesyłową	
	• w złożu może występować poduszka gazowa, tj. pewna niewydobyta ilość gazu, która po przekształceniu złoża na magazyn, będzie stanowić pojemność buforową	nie dotyczy
Wady	• otwory wiertnicze i infrastruktura naziemna wymagają kosztownych rekonstrukcji i remontów z uwagi na stan techniczny oraz sprawdzenia ich szczelności (tzw. szczelność techniczna)	
	• zazwyczaj zdolne do wykonywania tylko jednego cyklu napełniania i odbioru w ciągu roku z uwagi na warunki przepływu w kolektorze	nie dotyczy

3.2.1.2. Obiekty w formacjach wodonośnych

Potencjalnie największe ilości substancji lub odpadów w stanie gazowym i ciekłym można by wtłaczać do obiektów podziemnych zlokalizowanych w formacjach wodonośnych z uwagi na ich znaczne rozprzestrzenienie w górotworze (Ślizowski K., 1998). Formacje wodonośne po raz pierwszy zostały wykorzystane do magazynowania gazu w 1946 r. w Kentucky w Stanach Zjednoczonych Ameryki (Favrez, 2003 za Evans, 2007). Podziemne magazyny w tych formacjach są drugim pod względem częstości występowania na świecie typem magazynów gazu (ipi.gasstoragepoland.pl). Obecnie na świecie znajduje się ok. 80 obiektów magazynowych ulokowanych w formacjach wodonośnych, a większość z nich rozmieszczona jest w Stanach Zjednoczonych, byłym Związku Radzieckim oraz w południowej i zachodniej Europie (Francja, Niemcy i Włochy) (Evans, 2007).

Obiekty podziemne w omawianych formacjach lokalizuje się w przepuszczalnych formacjach geologicznych zbudowanych ze skał porowatych/szczelinowatych (patrz: cz. I, rozdz. 2.2). Skały zbiornikowe to zazwyczaj skały okruchowe, porowate (np. piaskowce, rzadziej skały węglanowe), szczelinowate (np. wapienie lub dolomity).

Magazynowanie i składowanie w opisanych formacjach opiera się na tych samych zasadach, co w złożach węglowodorów, przy czym stanowi to bardziej kosztowną inwestycję. Zasady magazynowania lub składowania w formacji wodonośnej polegają na utworzeniu sztucznego zbiornika (złoża) przez zagospodarowanie warstwy wodonośnej i wtłaczanie gazów/cieczy do przestrzeni porowej (szczelin) (Evans, 2007). Objętość gazu/cieczy, jaką można maksymalnie zgromadzić, zależy od porowatości/szczelinowatości, ciśnienia piezometrycznego wód w warstwie, głębokości występowania oraz od temperatury i średniego ciśnienia, pod którym gaz/ciecz mają być przechowywane (Kaliski i in., 2010). Aby wybudować obiekt w formacjach wodonośnych muszą być spełnione dwa podstawowe warunki geologiczne (ipi.gasstoragepoland.pl):

– formacja (kolektor), do której zamierza się zatłaczać substancje/odpady jest zbudowana ze skał o dużej porowatości;
– nad formacją znajduje się nieprzepuszczalny nadkład izolujący (naturalna bariera geologiczna), zapobiegający ucieczkom wtłaczanych substancji/odpadów i zapewniający szczelność geologiczną struktury.

Charakterystycznym procesem zachodzącym w podziemnych obiektach w formacjach wodonośnych jest wypychanie z nich wody podczas wtłaczania substancji/odpadów do kolektora. W efekcie zatłaczania następuje wzrost ciśnienia, które oddziałuje na kolektor oraz warstwy uszczelniające. Jeżeli ciśnienie przekroczy tzw. wartość ciśnienia szczelinowania, może dojść do uszkodzenia warstw uszczelniających, co spowoduje rozszczelnienie struktury i wyciek płynu (tzw. efekt przekroczenia ciśnienia szczelinowania) (Lippman, Benson, 2003 za Evans, 2007). Przekroczenie ciśnienia szczelinowania może również doprowadzić do powstania szczelin w formacji wodonośnej, powodując wzrost przepuszczalności i poprawę właściwości zbiornikowych kolektora. Możliwa jest również sytuacja, w której substancje/odpady są od razu zatłaczane do kolektora pod ciśnieniem szczelinującym z uwagi na zbyt niską przepuszczalność (Ślizowski K., 1998). Podziemne magazynowanie gazu w formacjach wodonośnych jest objęte normą PN-EN 1918-2, w której wyjaśniono m.in. koncepcję i wymagania dotyczące budowy takiego obiektu.

Zalety i wady podziemnych obiektów w formacjach wodonośnych zestawiono w tabeli 3. W przeciwieństwie do podziemnych obiektów w złożach węglowodorów, znalezienie odpowiedniej formacji wodonośnej wymaga prowadzenia kosztownych prac poszukiwawczych i rozpoznawczych (wynika to z ustawy pgg), tak żeby udokumentować szczelność geologiczną struktury, jej zdolność do gromadzenia substancji/odpadów pod ciśnieniem oraz opracować charakterystykę zbiornika i struktury geologicznej. Ponadto z uwagi na ograniczenia środowiskowe wynikające z przepisów prawa, magazynowanie i składowanie w tych formacjach jest możliwe tylko w warstwach, w których występują wody zasolone (solanki), szczelnie odizolowane od wyżej leżących warstw słodkich wód podziemnych (ustawa Prawo wodne, ustawa pgg). Z uwagi na uwarunkowania geologiczne w magazynach w formacjach wodonośnych występuje wyższe ciśnienie, co wpływa na zwiększenie mocy odbioru z magazynu

Tabela 3

Zalety i wady obiektów podziemnych w formacjach wodonośnych (https://ipi.gasstoragepoland.pl)

Rodzaj obiektu podziemnego / Cechy obiektu podziemnego	Podziemny magazyn substancji w formacjach wodonośnych	Podziemne składowisko odpadów w formacjach wodonośnych
Zalety	• zapewniona szczelność techniczna	
	• zazwyczaj zlokalizowane blisko odbiorców końcowych • stosunkowo wysoka moc odbioru • duża zdolność do wielu cykli w sezonie	• mogą być zlokalizowane blisko wytwórcy odpadów • duża pojemność np. na potrzeby składowania CO_2
Wady	• zazwyczaj słabo rozpoznana struktura geologiczna, wymaga kosztownych prac poszukiwawczych i rozpoznawczych • istnieje ryzyko nieszczelności struktury • większe koszty operacyjne np. związane z wydobyciem i utylizacją wydobywanej wody • istnieje konieczność utworzenia poduszki gazowej • konieczność budowy infrastruktury technicznej, zarówno podziemnej, jak i naziemnej	

i możliwość dostarczania dużych ilości gazu do systemu gazowniczego w sytuacjach kryzysowych (ipi.gasstoragepoland.pl). Często dodatkowym kosztem jest budowa brakujących elementów infrastruktury technicznej umożliwiającej obsługę obiektu podziemnego, takich jak: otwory wiertnicze, infrastruktura przesyłowa, rurociągi itp. (Evans, 2007).

W podziemnych magazynach w formacjach wodonośnych można gromadzić tylko substancje w stanie ciekłym i gazowym, np. ropę naftową, gaz LNG lub LPG oraz inne paliwa płynne (patrz: tab. 30 str. 111). Ze względu na niepewną szczelność geologiczną magazynowanie wodoru i sprężonego powietrza jest rzadko brane pod uwagę (Matos i in., 2019).

W podziemnych składowiskach odpadów w formacjach wodonośnych mogą być umieszczane tylko wybrane odpady w stanie ciekłym i gazowym, np. odpady niebezpieczne czy solanki z górnictwa lub przemysłu chemicznego (Ślizowski K., 1998). Formacje wodonośne stanowią dobre miejsce do wielkoskalowego składowania CO_2 z uwagi na duże pojemności (patrz: tab. 30 str. 111).

3.2.1.3. Obiekty w formacjach złóż węgla kamiennego

Złoża węgla kamiennego stanowią potencjalne struktury, które mogą być wykorzystywane na potrzeby lokalizowania podziemnych składowisk dwutlenku węgla (patrz: tab. 30 str. 111). Technologia składowania CO_2 w formacjach złóż węgla kamiennego (tzw. CO_2-ECBMR) została po raz pierwszy zastosowana w połowie lat 90. XX w. w basenie San Juan w stanie Nowy Meksyk – Stany Zjednoczone Ameryki (Davis i in., 2004; Wójcicki, 2009).

Podziemne składowiska dwutlenku węgla w omawianych formacjach lokalizuje się tylko w nieeksploatowanych złożach węgla kamiennego (patrz: cz. I, rozdz. 2.4).

Metoda składowania dwutlenku węgla w formacjach złóż węgla kamiennego polega na zastąpieniu zaadsorbowanego w pokładach węgla metanu przez dwutlenek węgla. W procesie adsorpcji/desorpcji dwutlenek węgla wypiera znajdujący się w pokładzie węgla metan, który jest pozyskiwany przez otwory wydobywcze. Dwutlenek węgla wtłaczany w przestrzenie porowe pokładów węgla jest adsorbowany dwukrotnie szybciej przez węgiel niż metan (Gluyas, Mathias, 2013).

Zalety i wady podziemnych obiektów w formacjach złóż węgla kamiennego zestawiono w tabeli 4.

W formacjach złóż węgla kamiennego składuje się tylko dwutlenek węgla (patrz: tab. 30 str. 111). Na świecie jest to prowadzone tylko w skali eksperymentalnej. Zrealizowane w tym zakresie projekty naukowe w Polsce (Wójcicki, 2009; Wójcicki i in., 2013) potwierdzają możliwość składowania CO_2 w formacjach złóż węgla kamiennego na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) przy jednoczesnym wspomaganiu wydobycia metanu (CO_2-ECBMR).

3.2.1.4. Obiekty w naturalnych pustkach skalnych

Na świecie obiekty w naturalnych pustkach skalnych[6] są bardzo rzadko wykorzystywane na podziemne magazyny lub składowiska z uwagi na niewielkie rozmiary, nieregularne kształty, punktowe rozmieszczenie, niski poziom rozpoznania budowy geologicznej, brak infrastruktury oraz niepewną szczelność geologiczną. Lokalizuje się je w słaboprzepuszczalnych formacjach skalnych (patrz: cz. I., rozdz. 2.3).

W przypadku obiektów podziemnych, lokalizowanych w naturalnych pustkach skalnych, zasadnicze znaczenie ma sprawdzenie i kontrola szczelności oraz stateczności geomechanicznej pustki skalnej (Kidybiński, Siemek, 2006; Kaliski i in., 2010). Obiekty podziemne w naturalnych pustkach skalnych charakteryzują się ograniczoną pojemnością, wynikającą z naturalnych wymiarów pustki. Ich rozciągłość, kształt i objętość jest z góry określona, gdyż zostały uformowane przyrodniczo. Wody podziemne otaczające słaboprzepuszczalne formacje geologiczne, w których istnieją naturalne pustki skalne, nie stanowią zagrożenia dla obiektu podziemnego, jeżeli istnieje naturalna izolacja pomiędzy poszczególnymi

[6] Definicja *naturalne pustki skalne* została podana na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

Tabela 4

Zalety i wady obiektów podziemnych w formacjach złóż węgla kamiennego (Gluyas, Mathias, 2013)

Cechy obiektu podziemnego	Obiekty podziemne w formacjach złóż węgla kamiennego
Zalety	• możliwość zagospodarowania nieeksploatowanych pokładów węgla • możliwość odzyskania metanu z nieeksploatowanych pokładów węgla w przyjazny dla środowiska sposób • możliwy transport CO_2 na duże odległości, co sprzyja lokalizacji składowiska zarówno na lądzie, jak i na morzu • CO_2 jest na stałe zatrzymywany w składowisku, pod warunkiem odpowiedniego uszczelnienia otworów zatłaczających
Wady	• mniejsza pojemność składowiska niż w przypadku innych struktur • wysokie koszty badań rozpoznawczych pokładów węgla • konieczność wybudowania infrastruktury technicznej m.in. do transportu CO_2 • ryzyko wycieku CO_2 przez nieszczelne otwory wiertnicze o różnej funkcji • możliwość zanieczyszczenia metanu przez CO_2 w przypadku zadania niewłaściwego ciśnienia zatłaczania • możliwość zniszczenia struktury pokładów węgla przez zadanie niewłaściwego ciśnienia, co może powodować utratę szczelności struktury • odzyskiwanie metanu z pokładów węgla może być ekonomicznie nieopłacalne, ponieważ wartość handlowa uwolnionego (pozyskanego) metanu nie rekompensuje całkowicie kosztów zatłaczania

Tabela 5

Zalety i wady obiektów podziemnych w naturalnych pustkach skalnych

Cechy obiektu podziemnego	Obiekty podziemne w naturalnych pustkach skalnych
Zalety	• zazwyczaj płytkie występowanie
Wady	• występowanie punktowe • brak rozpoznania geologicznego, wymaga kosztowanych badań • lokalizacja jest wskazana przez naturę, w związku z tym nie ma możliwości ingerowania w głębokość, kształt i wielkość przestrzeni do magazynowania lub składowania • niepewna szczelność • mała pojemność • konieczność budowy infrastruktury naziemnej i podziemnej

poziomami wodonośnymi a słaboprzepuszczalną formacją skalną i pustką skalną.

Zalety i wady podziemnych obiektów w naturalnych pustkach skalnych zestawiono w tabeli 5.

Ze względu na niewielki zasięg i pojemność, obiekty te mają ograniczone możliwości pojemnościowe, ale nadają się do składowania i magazynowania dowolnych substancji i odpadów. W obiektach podziemnych w naturalnych pustkach można magazynować substancje w postaci stałej, ciekłej i gazowej, w tym m.in. ropę naftową, gaz LNG, gaz LPG, butan, propan oraz inne paliwa płynne (patrz: tab. 30 str. 111) (Evans, 2007) oraz składować różne odpady, przy czym fizyczna postać odpadów może być zróżnicowana. Przechowywanie CO_2 jest w nich możliwe, lecz ze względów ekonomicznych i zbyt małych pojemności tego typu struktury pod względem przemysłowym nie są rozpatrywane jako potencjalne kompleksy jego składowania (patrz: tab. 30 str. 111) (Piessons, Dusar, 2003 i Shi, Durucan, 2005 za Evans, 2007).

3.2.2. Charakterystyka podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów w strukturach antropogenicznych

3.2.2.1. Obiekty w komorach solnych

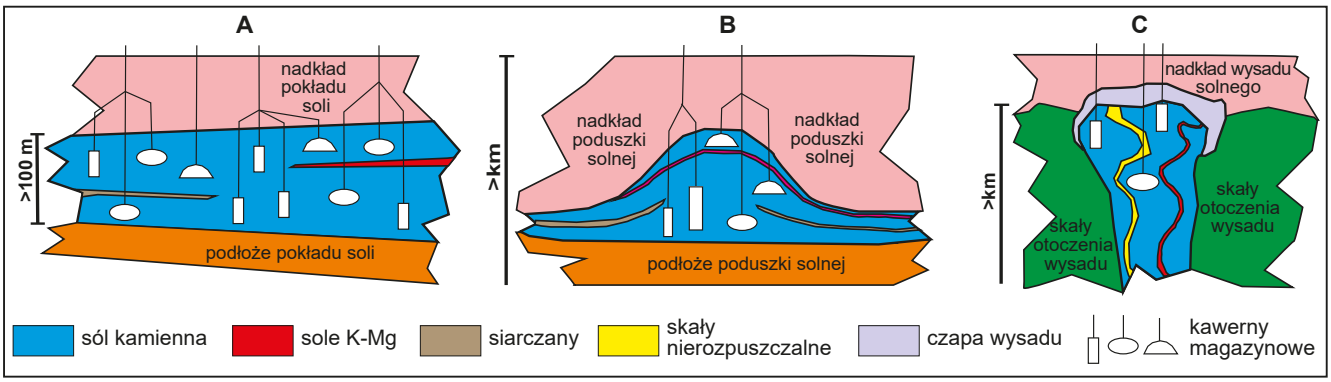
Bardzo powszechnym rodzajem obiektów podziemnego magazynowania i składowania są magazyny lub składowiska w ługowanych komorach solnych. Są one trzecim pod względem częstości występowania na świecie typem magazynu gazu i na ich temat istnieje bogata literatura[7]. Pierwszy magazyn gazu ziemnego w ługowanej komorze solnej powstał w Melville, Saskatchewan w Kanadzie w 1963 r. W Europie magazynowanie gazu ziemnego w ługowanych komorach solnych rozpoczęto w Armenii, następnie w Niemczech i Francji. W Stanach Zjednoczonych pierwszy taki magazyn gazu ziemnego wybudowano w 1970 r. – Eminence Dome, Missisipi. Podziemne magazyny gazu w adoptowanych, poeksploatacyjnych komorach solnych funkcjonują w Kanadzie od końca lat 40., w Stanach Zjednoczonych w Teksasie – od początku lat 50., a w Niemczech od 1972 r. W Stanach Zjednoczonych na początku lat 90. w Teksasie było ich 648, natomiast w 2003 r. użytkowano już ponad 1000 obiektów podziemnych. Obecnie na całym świecie tysiące komór solnych było (lub jest) wykorzystywanych do przechowywania produktów węglowodorowych.

Obiekty podziemne w komorach solnych lokalizuje się w formacjach względnie jednorodnych, wykształconych w formie pokładów (rys. 16A), poduszek (rys. 16B) oraz wysadów solnych (rys. 16C).

Komory solne mogą być ługowane specjalnie na potrzeby magazynowania i składowania lub adaptowane po wyeksploatowaniu soli (tzw. komory poeksploatacyjne). Podziemne magazynowanie gazu w komorach solnych jest objęte normą PN-EN 1918-3, która wyjaśnia koncepcję i wymagania dotyczące budowy i eksploatacji tego typu magazynów. Z punktu widzenia magazynu/składowiska poeksploatacyjne komory solne nie zawsze są odpowiednio dobrane pod względem kształtu i rozstawu. Obecnie rozwój technik ługowniczych sprzyja projektowaniu i ługowaniu komór, które będą przystosowane do poeksploatacyjnego zagospodarowania na podziemny magazyn/składowisko (Evans, 2007).

Funkcjonowanie ogromnej liczby podziemnych magazynów i składowisk w komorach solnych wynika z wyjątkowych właściwości soli – są praktycznie nieściśliwe, niskoporowate, praktycznie nieprzepuszczalne oraz dobrze rozpuszczalne i urabialne (Kłeczek, Zeljaś, 2005; Matos i in., 2019). Dodatkowo duża podatność soli na pełzanie prowadzi do naturalnej likwidacji nieciągłości w górotworze solnym (Evans, 2007), przy czym we wszystkich komorach solnych zachodzi proces konwergencji, co wpływa na zmianę kształtu i objętości komór. Rozpuszczalność pozwala na szybkie tworzenie komór technikami ługowniczymi. Należy jednak zauważyć, że istnieją przykłady kawern solnych, które uległy kruchej deformacji na skutek wysokiego tempa odkształcenia, co wskazuje, że sole nie zawsze zachowują się w sposób plastyczny, a powstałe pęknięcia mogą powodować roz-szczelnienie obiektu i ucieczkę zgromadzonego płynu (Terrinha i in., 1994 oraz Davison i in., 1996a za Evans, 2007). Szczególnie niebezpieczne jest odkształcenie ściany wysadu lub jego czapy. Może dojść do spękania osłony struktury solnej, co umożliwi inwazję agresywnych wód słodkich, które mogą przebić się do kawerny i doprowadzić do jej rozszczelnienia.

[7] Allen, 1972; Foh i in., 1979; Jenyon, 1986; Vattenfall, 1987; Seni i in., 1995; Neal, Magorian, 1997; Tomasko i in., 1997; Hovorka, 2000; Thoms, Gehle, 2000; Bérest i in., 2001; Brassow, 2001; Crotogino i in., 2001; Leith, 2001; Bérest, Brouard, 2003; Favrez, 2003; Knott, 2003; Evans, 2007; https://ipi.gasstoragepoland.pl.



Rys. 16. Możliwości lokalizacji obiektów podziemnych w strukturach solnych (Czapowski, 2019; uzupełnione)

A – pokładowe wystąpienie soli, **B** – poduszka solna, **C** – wysad solny; >km – może przekraczać kilka kilometrów

Ługowanie komór solnych w formacjach solnych jest możliwe pod warunkiem, że: zalegają na głębokościach umożliwiających magazynowanie/składowanie, mają wystarczającą miąższość, kształt i objętość do uformowania komór solnych oraz są jednorodne i zbudowane z soli o odpowiednim składzie (Kaliski i in., 2010). W przypadku wysadów skomplikowana budowa wewnętrzna oraz niejednorodność górotworu utrudnia ługowanie komór solnych. Zmienna podatność soli różnego typu na ługowanie powoduje, że operatorzy otworów ługowniczych starają się omijać przewarstwienia skał o zbyt wysokiej lub niskiej ługowalności, żeby otrzymać optymalny kształt komór. W przypadku wystąpień złóż pokładowych projektowane komory lokuje się w pokładzie soli z pominięciem możliwych przewarstwień soli potasowo-magnezowych (o największej rozpuszczalności i plastyczności) i skał niesolnych (nierozpuszczalnych i kruchych), zachowując ochronne półki i filary pomiędzy komorami (rys. 16A). Budowa geologiczna takich złóż umożliwia wykonanie licznych komór, których wysokość (a zarazem pojemność) jest ograniczona miąższością dostępnego pokładu jednorodnej soli kamiennej (np. Wagner, 1995; Czapowski, 2019). Również w poduszkach solnych formowanie komór jest utrudnione z uwagi na często występujące powtórzenia i deformacje warstw soli potasowo-magnezowych oraz skał niesolnych. Rekompensuje to częściowo lokalnie większa miąższość dostępnego pokładu soli kamiennej, umożliwiająca wykonanie komór o większej wysokości i pojemności (rys. 16B). Jak wspomniano wyżej wysad solny charakteryzuje bardzo skomplikowana i niejednorodna budowa wewnętrzna, dlatego ulokowanie w nim komory jest możliwe po odwierceniu otworu do planowanej głębokości spągu komory i potwierdzeniu występowania w nim miąższej i w miarę jednorodnej serii soli kamiennej. Oprócz wspomnianych wcześniej wystąpień soli potasowo-magnezowych, siarczanów i węglanów, w przypadku obszaru Polski istotne jest rozpoznanie warstw iłowców i zubrów (np. Wagner, 1995; Ślizowski K. i in., 2005), których ługowanie może zanieczyścić kawerny pelitem ilastym. Korzystną cechą wysadów jest możliwość wykonania bardzo pojemnych komór o wysokości kilkuset metrów (Brańka, Wawrzyniak, 1994; Gąska, 2000; Gąska i in., 2012; Jasiński, 2000, 2004), ulokowanych na różnych głębokościach (rys. 16C). Poza uwarunkowaniami technologicznymi, głębokość kawern jest określona tempem ich zaciskania, które wzrasta wraz z ciśnieniem i temperaturą. Wzrost temperatury i ciśnienia litostatycznego z głębokością stanowi istotne ograniczenie dla lokowania kawern.

Zalety i wady obiektów podziemnych w komorach solnych zestawiono w tabeli 6. Niewątpliwe możliwość uzyskania dużych pojemności magazynowych lub pojemności przeznaczonych do składowania przy zajęciu niewielkich powierzchni terenu pod infrastrukturę jest pozytywem (Kaliski i in., 2010). Obiekty zlokalizowane w komorach solnych charakteryzują się bardzo wysoką efektywnością zatłaczania i odbioru (w przypadku magazynów) w stosunku do pojemności

Tabela 6

Zalety i wady obiektów podziemnych w komorach solnych (https://ipi.gasstoragepoland.pl)

Cechy obiektu podziemnego	Obiekty podziemne w komorach solnych
Zalety	• niski stosunek pojemności buforowej do całkowitej pojemności obiektu • bardzo duża moc zatłaczania i odbioru (o wiele większa niż w przypadku magazynów w złożach węglowodorów i warstwach wodonośnych) • zdolność do wykonywania wielu cykli napełniania i odbioru w ciągu roku • niskie ryzyko nieszczelności obiektu
Wady	• lokalna niejednorodność górotworu solnego • wysokie nakłady inwestycyjne konieczne przy budowie • wysokie koszty operacyjne • ograniczone możliwości zagospodarowania lub zrzutu solanki powstającej w czasie ługowania komór • utrata pojemności czynnej w wyniku konwergencji kawern

czynnych. Magazyny w komorach solnych mogą wykonywać wiele cykli zatłaczania i odbioru w ciągu roku, co pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów ich funkcjonowania w przeliczeniu na jednostkę zmagazynowanej substancji. Pomimo, że obiekty w komorach solnych są najdroższe w budowie i utrzymaniu, to stanowią bardzo dobre zabezpieczenie w przypadku gwałtownego wzrostu zapotrzebowania na energię. Są również bardzo przydatne w regulowaniu krótkotrwałych wahań popytu, zarówno w skali ogólnokrajowej, jak i lokalnej (Kaliski i in., 2010; https://ipi.gasstoragepoland.pl). Co ważne w przypadku magazynów w komorach solnych, pełnią one rolę uzupełniającą dla istniejących dużych magazynów w formacjach porowatych/szczelinowatych, ponieważ wymagają znacznie krótszego czasu napełniania oraz niskiego poziomu gazu buforowego (który można prawie całkowicie odzyskać przy likwidacji obiektu) (Evans, 2007).

Obiekty podziemne w komorach solnych mogą być wykorzystywane do przechowywania substancji w stanie ciekłym i gazowym, w tym: ropy naftowej, gazu LNG lub LPG, węglowodorów gazowych, wodoru, sprężonego powietrza (np. Crotogino i in., 2001; Leith, 2001; Cheung i in., 2003 za Evans, 2007; Matos i in., 2019), lub do składowania odpadów w różnej postaci fizycznej, w tym także stałej (np. Veil i in., 1998 za Evans, 2007).

Składowanie dwutlenku węgla jest możliwe od strony technicznej, lecz poza wyjątkowymi przypadkami jest nieopłacalne ekonomiczne z uwagi na relatywnie małe objętości komór w porównaniu ze składowiskami w kolektorach solankowych (Poborska-Młynarska, 2008).

3.2.2.2. Obiekty w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Podziemne magazyny i składowiska w komorach skalnych oraz w wyrobiskach górniczych kopalń podziemnych mogą być projektowane i budowane w:

- specjalnie wykonanych komorach skalnych (innych niż ługowane komory solne [rozdz. 3.2.2.1] i naturalne pustki [rozdz. 3.2.1.4]);
- wyeksploatowanych wyrobiskach górniczych czynnych lub nieczynnych kopalń podziemnych.

Obiekty podziemne w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych funkcjonujące na świecie, to głównie podziemne składowiska odpadów stałych, w mniejszym stopniu podziemne bezzbiornikowe magazyny substancji[8]. Obiekty podziemne w komorach skalnych są budowane i używane do magazynowania substancji od ponad 100 lat. Technika magazynowania gazu LPG została po raz pierwszy przetestowana w Stanach Zjednoczonych w Teksasie w 1950 r. przy budowie magazynu w formacji łupkowej. Pierwszy taki magazyn w Europie powstał we Francji w 1966 r., a dwa lata później w Szwecji (niedaleko Göteborga). Do połowy lat 90. w Stanach Zjednoczonych uruchomiono ok. 70 magazynów LPG w komorach skalnych, z czego ok. 20 w Europie, głównie w Skandynawii. Komory skalne funkcjonują również jako podziemne magazyny sprężonego powietrza. Pierwszy taki magazyn powstał w okolicach Heilbronn ok. 1899 r. w Niemczech. Podziemne magazyny substancji i składowiska odpadów w wyrobiskach kopalń podziemnych funkcjonują na świecie od połowy XX w. Na podziemne magazyny gazu jako pierwsze zostały przekształcone kopalnie węgla: Leyden w hrabstwie Jefferson w Denver w stanie Kolorado (1959 r.) oraz Anderlues i Péronnes w zagłębiu węglowym Hainaut w Belgii (lata 1975, 1982). Pierwszy magazyn gazu w kopalni wapieni zaczął funkcjonować w pobliżu Lawrenceburg w stanie Indiana w Stanach Zjednoczonych w 1952 r. Podziemne składowanie odpadów w wyrobiskach kopalń podziemnych jest praktykowane od kilkudziesięciu lat w Niemczech, a od niedawna także w innych krajach Europy Zachodniej.

Obiekty podziemne w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych lokalizuje się w słaboprzepuszczalnych formacjach skalnych (patrz: cz. I, rozdz. 2.3). W zależności od ich funkcji, można je lokalizować w różnych skałach, m.in.: ilastych, magmowych i metamorficznych krystalicznych, osadowych krystalicznych (węglanowych, solnych) lub w pokładach węgla. Najczęściej na podziemne magazyny i składowiska w kopalniach podziemnych adaptuje się kopalnie w formacjach solnych, pokładach węgla kamiennego, w formacjach zbudowanych ze skał węglanowych oraz skał ilastych (Evans, 2007).

Zasady działania obiektów podziemnych w komorach skalnych i wyrobiskach kopalń podziemnych zależą od wielu aspektów, np.: funkcji jaką ma pełnić obiekt podziemny, warunków geologicznych, rozwiązań projektowo-wykonawczych, warunków eksploatacji, a także od stanu skupienia magazynowanych substancji lub składowanych odpadów.

Obiekty w komorach skalnych są specjalnie projektowane i wykonywane w wybranej do tego celu lokalizacji. Zasady eksploatacji są ustalane indywidualnie dla każdego obiektu. Gdy wyrobiska kopalń podziemnych są adoptowane na potrzeby funkcjonowania obiektu podziemnego, zasady ich eksploatacji są również indywidualnie ustalane.

W kwestii obiektów podziemnych w komorach skalnych i wyrobiskach kopalń podziemnych, podobnie jak w przypadku obiektów w naturalnych pustkach skalnych, zasadnicze znaczenie ma sprawdzenie i kontrola szczelności oraz ich stateczność geomechaniczna (Kidybiński, Siemek, 2006; Kaliski i in., 2010).

Ze względu na szczelność podziemne magazyny substancji ciekłych lub gazu w komorach skalnych lub w wyrobiskach kopalń podziemnych wykonuje się w dwóch wariantach (Evans, 2007):

- obiekty z wewnętrzną obudową (LRC – *lined rock caverns*);
- obiekty bez obudowy (URC – *unlined rock caverns*).

W celu zapewnienia wymaganej szczelności w magazynie bez obudowy muszą być spełnione cztery podstawowe warunki:

- magazynowana substancja w stanie gazowym lub ciekłym musi być lżejsza od wody;

[8] Aufricht, Howard, 1961; Lindblom, 1989; Liang, Lindblom, 1995; Vasquez, Tengborg, 2001; Norton Energy, 2001; Sandia, 2001 za Evans, 2007; Evans, 2007; Plaat, 2009; Poborska-Młynarska, Korzeniowski, 2015; https://ipi.gasstoragepoland.pl.

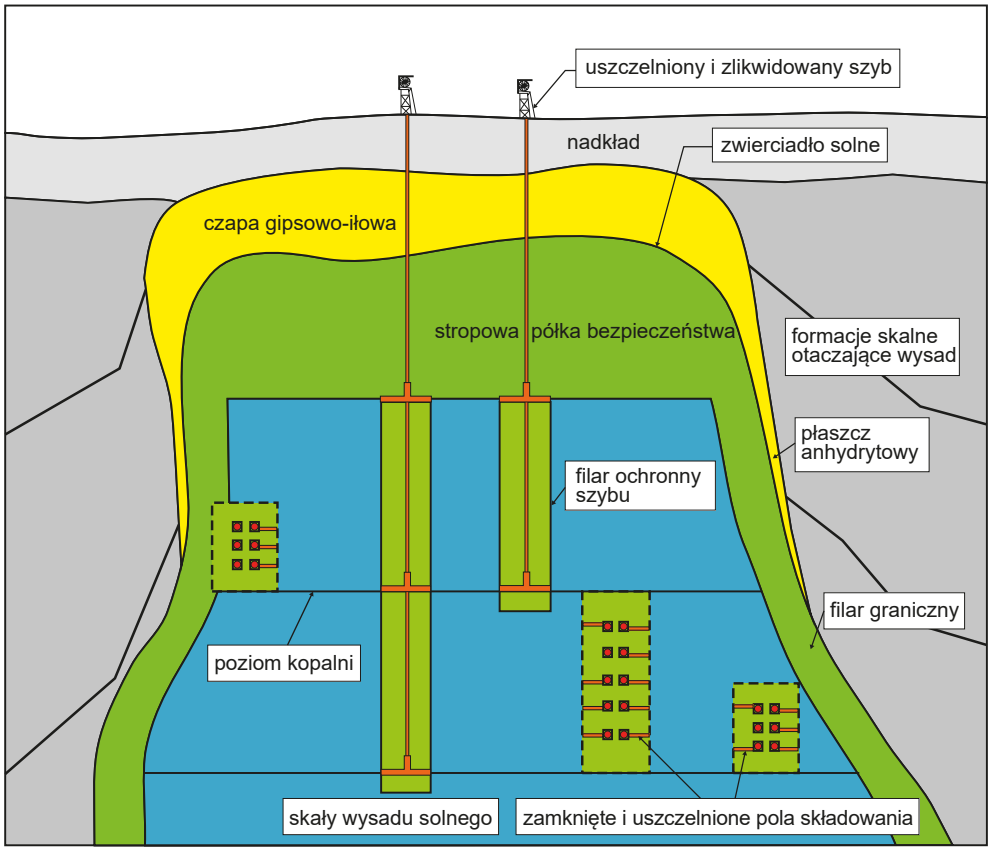
– magazynowana substancja w stanie gazowym lub ciekłym nie może być rozpuszczalna w wodzie i w szczególności nie może zachodzić proces mieszania się jej z wodą na granicy faz;
– górotwór w otoczeniu magazynu powinien być nasycony wodą z kierunkiem gradientu ciśnienia skierowanym ku komorze magazynowej;
– warunki geologiczne i klasa jakości górotworu, w której zlokalizowano magazyn, musi być odpowiednio wysoka i zapewniać długotrwałą stateczność geomechaniczną, co najmniej w przewidywanym okresie użytkowania magazynu.

Podziemne magazyny bez obudowy funkcjonują od dziesięcioleci, są wykorzystywane do przechowywania szerokiej gamy substancji, a z uwagi na zapewnienie szczelności są lokowane na odpowiedniej głębokości, najlepiej poniżej zwierciadła wód podziemnych (Goodall, 1986; Goodall i in., 1988; Evans, 2007). Szczelność magazynu jest osiągana przez zapewnienie normalnego ciśnienia hydrostatycznego w wyrobisku (Kjørholt, 1991), kontrolę ciśnienia wód podziemnych za pomocą zbiorników wyrównawczych (Aberg, 1977; Kjørholt, 1991) lub przez tzw. kurtynę wodną (Liang, Lindblom, 1995; Yamamoto i Pruess, 2004 za Evans, 2007).

W szczególnych przypadkach obiekty podziemne mogą wymagać wykonania specjalnej obudowy. Wewnętrzna powierzchnia komory jest wtedy dodatkowo uszczelniana specjalną plastikową substancją lub cienką powłoką metalową i cementem (Kaliski i in., 2010).

Podziemne magazyny substancji mogą być również lokalizowane w komorach wykonywanych w utworach węglanowych przez rozpuszczanie skały kwasem w podobny sposób, w jaki tworzy się komory solne przy użyciu technik ługowniczych (Castle i in., 2004 za Evans, 2007; Plaat, 2009). Prace te na razie są na etapie badań eksperymentalnych, gdyż konieczne jest rozwiązanie problemów związanych z gazoszczelnością i stabilnością kawern oraz utylizacją dużych ilości CO_2, które powstają w wyniku rozpuszczania skał węglanowych (Evans, 2007).

W przypadku podziemnych składowisk odpadów w komorach bez obudowy szczelność jest zapewniana poprzez system sztucznych i naturalnych barier. Należy podkreślić, że podziemne składowiska odpadów mogą zostać wybudowane tylko w formacjach geologicznych spełniających wymagania dla naturalnej bariery geologicznej (ustawa pgg, Ślizowski K. i in., 2004; Siemek, Nagy, 2007; Norris, 2019), która ma na celu zapewnić szczelność i bezpieczeństwo składowiska. Izolacja odpadów w podziemnych składowiskach jest osiągana przez utworzenie izolującego systemu: odpady–składowisko–górotwór (Langer, 2001; Behnsen, 2008). Przykładową koncepcję izolacji odpadów w wyrobiskach kopalni podziemnej w wysadzie solnym przedstawiono na schemacie – rys. 17, gdzie izolacje zapewniają:
– naturalna bariera, którą stanowi wysad solny i ewentualnie skały otaczające;
– sztuczne bariery (inżynierskie, geotechniczne), na które składają się: fizyczna postać odpadów, rodzaj



Rys. 17. Schemat izolacji odpadów w kopalni podziemnej w wysadzie solnym (Poborska-Młynarska, Korzeniowski, 2015)

opakowania, sposób uszczelnienia wyrobisk, środki służące tamowaniu, wypełnieniu, uszczelnieniu i zamknięciu obszaru składowiska oraz środki służące likwidacji kopalni i uszczelnieniu szybów.

Podziemne składowiska odpadów są przede wszystkim zakładane w kopalniach soli, ponieważ warunki panujące w formacjach solnych zazwyczaj są korzystne dla trwałej izolacji odpadów od wód podziemnych i biosfery. W kopalniach soli zachowuje się bariery i filary chroniące wyrobiska górnicze przed dopływem wód podziemnych spoza złoża oraz stosuje się systemy eksploatacji pozostające po wydobyciu kopaliny, niezlikwidowane wyrobiska górnicze (komory), które mogą być przeznaczone do składowania odpadów. Zasady składowania odpadów w kopalniach podziemnych w formacjach solnych są takie same dla obiektów w innych rodzajach kopalń czy w komorach skalnych

Zalety i wady podziemnych obiektów w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych zestawiono w tabelach 7 i 8.

W przypadku podziemnych magazynów substancji i składowisk odpadów w wyrobiskach kopalń podziemnych ich lokalizacja jest narzucona prowadzoną działalnością górniczą. Problemem jest również zmiana głębokości, wymiarów i rozstawu wyrobisk górniczych, co jest uzależnione warunkami

Tabela 7

Zalety i wady obiektów podziemnych w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Cechy obiektu podziemnego	Obiekty podziemne w komorach skalnych	Obiekty podziemne w wyrobiskach kopalń podziemnych
Zalety	• można zoptymalizować lokalizację obiektu • zapewniona szczelność • optymalizacja głębokości, kształtu i wielkości przestrzeni do magazynowania lub składowania	• bardzo dobrze rozpoznana budowa geologiczna • istniejąca infrastruktura techniczna, którą można wykorzystać
Wady	• brak rozpoznania geologicznego, wymaga kosztownych badań • konieczność wybudowania infrastruktury	• nie można zoptymalizować lokalizacji magazynu/składowiska • możliwy brak szczelności • nie ma się wpływu na głębokość, kształt i wielkość przestrzeni do magazynowania lub składowania

Tabela 8

Zalety i wady obiektów podziemnych z wewnętrzną obudową oraz bez obudowy (https://cordis.europa.eu/project/id/OG.-00270-97/it)

Cechy obiektu podziemnego	Obiekty podziemne z wewnętrzną obudową	Obiekty podziemne bez obudowy
Zalety	• zapewniona szczelność przez specjalne uszczelniające okładziny • substancje mogą być przechowywane pod dużym ciśnieniem na stosunkowo niewielkich głębokościach (100–200 m p.p.t.) • stabilność geotechniczna i konstrukcyjna • szerokie możliwości wyboru miejsca budowy z uwagi na zmniejszone ograniczenia wynikające z budowy geologicznej, a kompensowane przez sztuczne uszczelnienie • brak znaczącego wpływu na środowisko • brak wymiany przechowywanej substancji z otaczającym górotworem • stosunkowo krótki czas projektowania i budowy • możliwy dostęp do komór w celu prowadzenia kontroli i konserwacji na każdym etapie inwestycji	• substancje mogą być przechowywane na stosunkowo niewielkich głębokościach (100–200 m p.p.t.) • stosunkowo krótki czas projektowania i budowy • możliwy dostęp do komór w celu prowadzenia kontroli i konserwacji na każdym etapie inwestycji
Wady	• konieczne rozpoznanie geologiczne • konieczność wybudowania infrastruktury • małe pojemności gromadzenia • wymagają dużych nakładów finansowych • wykorzystywane lokalnie, w rejonach, gdzie przypowierzchniowe warstwy są zbudowane ze skał magmowych lub metamorficznych krystalicznych i nie istnieją naturalne struktury o większej przydatności do budowy podziemnych obiektów (Evans, 2007)	• konieczne rozpoznanie geologiczne • niepewna szczelność • konieczna kontrola stabilności geotechnicznej i konstrukcyjnej • ograniczone możliwości wyboru miejsca budowy z uwagi na zwiększone ograniczenia wynikające z budowy geologicznej • konieczność wybudowania infrastruktury • małe pojemności gromadzenia • mogą mieć znaczący wpływ na środowisko • następuje wymiana przechowywanej substancji z otaczającym górotworem

eksploatacji prowadzonej przez kopalnię. Jednak w porównaniu do naturalnych pustek (patrz: cz. I, rozdz. 3.2.1.4), wyrobiska górnicze kopalń powstają pod kontrolą inżynierską, co jest ogromną zaletą wykorzystywaną do projektowania podziemnego obiektu.

W przypadku obiektów podziemnych w komorach skalnych istnieje większa dowolność w ich lokalizowaniu oraz w doborze odpowiedniej formacji geologicznej. Głębokość, rozmiar i rozstaw komór można odpowiednio dobierać w zależności od funkcji, jaką ma pełnić obiekt, rodzaju gromadzonego odpadu/substancji, charakterystyki formacji i struktury geologicznej, a także właściwości skał, w których obiekt zostanie zlokalizowany. Tego typu obiekty wymagają bardzo dużych nakładów inwestycyjnych zarówno na rozpoznanie geologiczne, jak i wybudowanie infrastruktury. Ich ogromną zaletą jest natomiast projektowanie i budowa na konkretne zapotrzebowanie i w określonym celu.

W podziemnych magazynach w wyrobiskach kopalń podziemnych oraz w komorach skalnych można magazynować substancje w postaci stałej, ciekłej i gazowej, w tym m.in. gaz LNG, gaz LPG, butan, propan, ropę naftową, inne paliwa płynne oraz wodór i sprężone powietrze (patrz: tab. 30 str. 111) (Evans, 2007).

Podziemne składowiska w wyrobiskach kopalń podziemnych oraz w komorach skalnych mogą być wykorzystywane do składowania różnych odpadów. Składowiska przyjmują odpady w postaci stałej w różnych frakcjach (gruz budowlany, żużel, popioły, pyły, granulaty) pakowane zazwyczaj do worków. Odpady w postaci płynnej (zawiesiny, szlamy, osady) mogą być zestalane, np. w procesie wypełniania zbędnych wyrobisk górniczych, lub też składowane w wyrobiskach w odpowiednio bezpiecznych opakowaniach (beczkach, kontenerach).

Przechowywanie dwutlenku węgla jest w nich możliwe, ale ze względów ekonomicznych tego typu struktury jako potencjalne kompleksy jego składowania pod względem przemysłowym nie są na razie rozpatrywane (patrz: tab. 30 str. 111) (Piessons, Dusar, 2003 i Shi, Durucan, 2005 za Evans, 2007).

4. CZYNNIKI I KRYTERIA OCENY LOKALIZACJI PODZIEMNYCH BEZZBIORNIKOWYCH MAGAZYNÓW SUBSTANCJI ORAZ PODZIEMNYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

Optymalna lokalizacja obiektu podziemnego powinna kompleksowo uwzględniać wiele czynników, których kryteria są bardzo różnorodne. Czynniki te odgrywają różną rolę na kolejnych etapach procesu inwestycyjnego, a szczególnie przy wyborze optymalnej i bezpiecznej dla obiektu lokalizacji oraz technologii eksploatacji.

Proces poszukiwania lokalizacji dla obiektu podziemnego rozpoczyna się od określenia celu inwestycji. Następnie dokonuje się selekcji możliwych lokalizacji na podstawie zdefiniowanego wcześniej zbioru czynników[9] i kryteriów[10] oceny lokalizacji. Te ostatecznie wytypowane, poddawane są szczegółowej analizie, na podstawie której dokonuje się wyboru optymalnej lokalizacji obiektu podziemnego. Jest to zadanie interdyscyplinarne, wymagające pracy doświadczonego zespołu specjalistów i ekspertów z różnych dziedzin nauki oraz przemysłu.

Na wybór lokalizacji podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów składają się następujące czynniki i kryteria:

- geologiczne;
- techniczne;
- ekonomiczne;
- środowiskowe;
- społeczne;
- polityczne;
- administracyjno-prawne.

Wśród nich można wyróżnić:

- czynniki i kryteria obligatoryjne, które wynikają z przepisów prawa oraz decyzji administracyjnych, wykluczające wybór lokalizacji obiektu podziemnego;
- czynniki i kryteria nieobligatoryjne, które ustala inwestor w celu oceny i wyboru optymalnej lokalizacji obiektu podziemnego.

Zbiór odpowiednio ustalonych kryteriów stanowi podstawę do oceny i wyboru optymalnej lokalizacji obiektu podziemnego[11]. Wybór lokalizacji może się opierać na metodach punktowych lub analizach wielokryterialnych odpowiednio implementowanych z uwagi na specyficzne cechy obiektów podziemnych[12]. W zależności od wykorzystanej metody wyboru lokalizacji jest opracowywany ranking lokalizacji lub jest wybierana lokalizacja optymalna. Na tej podstawie podejmuje się decyzję inwestycyjną dotyczącą wyboru położenie obiektu podziemnego.

Czynniki geologiczne odgrywają podstawową rolę przy wyborze lokalizacji obiektu podziemnego, z tego względu bardziej szczegółowo omówiono je w dalszej części poradnika (cz. I, rozdz. 4.1). Obejmują wiele aspektów, w tym m.in. uwarunkowania górnicze dotyczące warunków prowadzenia oraz ewentualnego zakończenia eksploatacji, jej bezpieczeństwa i efektywności.

Opis czynników geologicznych jest uzupełniany charakterystyką innych czynników[13] warunkujących wybór lokalizacji, które pomimo optymalnych cech geologicznych struktury przeznaczonej na magazyn/składowisko, mogą ją wykluczyć z dalszych działań inwestycyjnych.

Lokalizacja podziemnego obiektu powinna bowiem uwzględniać ograniczenia w możliwościach przestrzennego zagospodarowania terenu, jak występowanie obszarów chronionych, sposób zagospodarowania górotworu[14], możliwość utylizacji dużych ilości odpadów powstających w czasie budowy i eksploatacji (np. odpadowe solanki), stan istniejącej infrastruktury technicznej naziemnej i podziemnej oraz stan budownictwa podziemnego (np. wyrobisk kopalń podziemnych). Czynniki i kryteria oceny lokalizacji powinny także

[9] Czynniki lokalizacji obiektów podziemnych obejmują specyficzne uwarunkowania i cechy lokalizacji oraz jej otoczenia służące do jej charakterystyki (syn. czynniki wyboru lokalizacji).

[10] Miarą czynników lokalizacji są kryteria oceny lokalizacji obiektu podziemnego (syn. kryteria lokalizacji, kryteria wyboru lokalizacji), tj. ustalone wskaźniki/parametry opisujące w sposób ilościowy lub jakościowy wytypowane do oceny cechy lokalizacji, tak żeby możliwe było porównanie lokalizacji oraz wybór optymalnej.

[11] Ślizowski K., 1998; Reinisch, 2000; Ślizowski K. i in., 2004; Macuda, Zawisza 2006; Kosowski i in., 2013; Wójcicki i in., 2013; Wójcicki, Nagy, 2014; Lewandowska-Śmierzchalska i in., 2018.

[12] Wybrane pozycje literatury: Marcak, Pilecki, 1998; Reinisch, 2000; Kidybiński, 2004; Ślizowski K. i in., 2004; Kłeczek i in., 2005; Siemek, Nagy, 2007; Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2007; Maciejewski, 2008; Kunstman i in., 2009; Laskowska i in., 2009; Pieńkowski, 2009; Tarkowski i in., 2009a, b; Ślizowski J., Urbańczyk, 2011; Gąska i in., 2012; Kaliski, Sikora, 2013; Lankof i in., 2013; Poborska-Młynarska, 2013; Wójcicki, Nagy, 2014; Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016; Sowiżdżał i in., 2017; Tarkowski, 2017; Lewandowska-Śmierzchalska i in., 2018; Czapowski, 2019.

[13] Wybrane pozycje literatury: Marcak i Pilecki, 1998; Reinisch, 2000; Macuda, Zawisza, 2006; Siemek, Nagy, 2007; Brańka, 2009; Jarosiński, Wójcicki, 2010; Kaliski i in., 2013; Zawisza, 2013; Wójcicki, Nagy, 2014.

[14] Przybycin i in., 2011; Quattrocchi i in., 2013; Uliasz-Misiak, Przybycin, 2016; Majer i in., 2018; Hámor-Vidó i in., 2021.

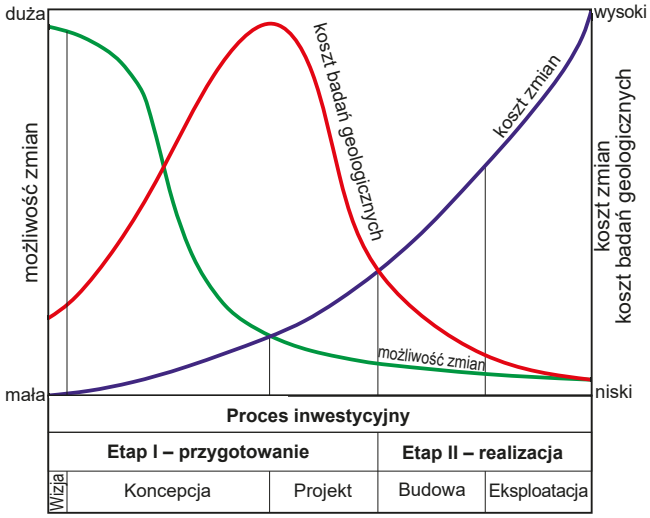
uwzględniać cele dokumentów strategicznych, konflikty środowiskowe, potrzeby gospodarki oraz oczekiwania społeczności lokalnej. Czynniki wyboru lokalizacji umożliwiają ocenić czy lokalizacja obiektu podziemnego jest potrzebna, akceptowana przez lokalną społeczność, bezpieczna dla środowiska, a jego budowa jest ekonomicznie uzasadniona.

Czynniki techniczne stanowią grupę czynników silnie oddziałujących na wybór lokalizacji obiektu podziemnego (Marcak, Pilecki, 1998; Macuda, Zawisza, 2006; Wójcicki, Nagy, 2014). Dotyczą m.in. oceny stanu istniejącej infrastruktury (czy są doprowadzone media, a jeżeli nie, to czy istnieje taka ewentualność), możliwości korelacji pracy instalacji naziemnej z warunkami pracy części podziemnej obiektu (Kaliski, 2010), oceny stanu technicznego infrastruktury i instalacji podziemnych, a także kontroli szczelności technicznej (Reinisch, 2000; Macuda, Zawisza 2006; Siemek, Nagy, 2007; Gąska i in., 2012).

Czynniki ekonomiczne mają znaczący wpływ na podjęcie pozytywnej lub negatywnej decyzji o rozpoczęciu inwestycji, w tym o wyborze lokalizacji obiektu podziemnego. Czynniki te dotyczą kosztów planowania, budowy, eksploatacji i likwidacji podziemnego obiektu, a także kosztów przystosowania infrastruktury naziemnej i podziemnej do pracy obiektu podziemnego w podziale na różne grupy kosztów, np. koszty: inwestycyjne planowane do poniesienia, alternatywne, związane z częścią podziemną lub naziemną obiektu[15]. Decyzje o budowie podziemnego obiektu powinny być podejmowane na podstawie kompleksowej analizy potrzeb, kosztów oraz korzyści (Brańka, 2009). Budowa obiektów podziemnych jest przedsięwzięciem wymagającym dużych nakładów finansowych[16]. Publikowane w literaturze koszty budowy podziemnego magazynu wahają się od 0,6 do 1,2 euro na 1 m^3 pojemności czynnej (tab. 9) (Kaliski i in., 2010).

Czynnik ekonomiczny jest ściśle związany z kosztem prac geologicznych. Na każdym etapie realizacji inwestycji udokumentowane dane geologiczne są niezbędne. Im więcej wiemy o środowisku geologicznym i geologiczno-inżynierskim na początku procesu inwestycyjnego, tym inwestycja jest bezpieczniej i ekonomiczniej przygotowana oraz realizowana (rys. 18) (Majer i in., 2018).

Należy podkreślić, że większe nakłady na badania geologiczne w fazie lokalizowania i charakterystyki obiektu mogą się zwrócić na etapie projektowania i eksploatacji obiektu. Dzięki odpowiedniemu wyborowi lokalizacji, co umożliwiają szczegółowe badania geologiczne i poniesione na nie środki finansowe, można zredukować koszty prac projektowych, budowy i późniejszej eksploatacji np. przez wybór optymalnych fragmentów przestrzeni geologicznej do budowy



Rys. 18. Schemat ideowy procesu inwestycyjnego (Majer i in., 2018)

podziemnego obiektu i jego najbardziej wydajnej pracy, zmniejszenie liczby i konfiguracji otworów zatłaczających i/lub odbierających oraz zminimalizowanie kosztów energii potrzebnej do zatłaczania płynów (ew. odbioru). Z kolei dzięki dobrej jakości uszczelnienia można zminimalizować koszty prowadzonego monitoringu. Tak więc wydatki związane z wykonaniem podziemnego obiektu mogą być zoptymalizowane m.in. na podstawie wczesnego i wyczerpującego rozpoznania warunków geologiczno-górniczych oraz oceny długotrwałego zachowania się układu masyw skalny–obiekt podziemny.

Czynniki środowiskowe mają istotny wpływ na wybór lokalizacji podziemnego obiektu ze względu na uzyskanie decyzji środowiskowej (Wójcicki, Nagy, 2014). Dotyczą oceny stanu środowiska i uwarunkowań środowiskowych występujących w rejonie lokalizacji (Macuda, Zawisza, 2006), zagrożeń, a także możliwości poprawy warunków środowiskowych po realizacji inwestycji. Bierze się też pod uwagę występowanie obszarów chronionych w najbliższym otoczeniu potencjalnej lokalizacji. Służą do wstępnej oceny możliwego wpływu inwestycji na rozpatrywany teren. Co ważne, obiekty podziemne zajmują duże przestrzenie górotworu pod powierzchnią terenu (Kaliski, 2010), przy jednoczesnym niewielkim zajęciu powierzchni terenu, dlatego ich negatywne oddziaływanie na otaczający krajobraz i jego walory jest mniejsze.

Czynniki społeczne obejmują istotne kwestie w procesie uzyskiwania akceptacji społecznej dla potencjalnej lokalizacji obiektu podziemnego (Jarosiński, Wójcicki, 2010). Są podstawą do oceny przychylności lokalnej społeczności dla planowanej inwestycji, ponieważ uwzględniają odległość terenów inwestycyjnych od zabudowy mieszkaniowej. Planując inwestycje polegającą na budowie podziemnego magazynu/składowiska należy uwzględnić prowadzenie działań informacyjnych i edukacyjnych już na początku procesu inwestycyjnego. Działania te mają na celu uświadomić i przygotować lokalną społeczności na możliwe zarówno pozytywne,

[15] Wybrane pozycje literatury: Marcak, Pilecki, 1998; Kunstman i in., 2002; Tarkowski i in., 2005; Stopa, Kosowski, 2006; Kosowski i in., 2007; Siemek, Nagy, 2007; Brańka, 2009; Kaliski i in., 2010; Gąska i in., 2012; Kaliski i in., 2013; Kaliski, Sikora, 2013; Kosowski i in., 2013; Kunstman, Urbańczyk, 2013; Zawisza, 2013; Wójcicki, Nagy, 2014; Górowska, 2015; Tarkowski, 2019.

[16] Stopa, Kosowski, 2006; Kosowski i in., 2007, 2013; Brańka, 2009; Górowska, 2015.

Tabela 9

Średnie nakłady inwestycyjne i średni okres budowy podziemnych magazynów gazu (PMG) (Kaliski i in., 2010 na podstawie „Study of Underground Gas Storage in Europe and Central Asia" – Working Party on Gas, Geneva, 19 stycznia 2010)

Rodzaj PMG	Średnie nakłady inwestycyjne [euro/m³]	Średni okres budowy [lata]
Warstwa wodonośna	0,7–1,0	10–12
Wyeksploatowana warstwa złoża	0,6–1,0	5–8
Komora solna	0,8–1,2	5–10

jak i negatywne zmiany (zagrożenia związane z inwestycją). Inwestor musi się zaangażować w działania informacyjne i edukacyjne np. przez bieżące komunikowanie lokalnej społeczności, organizowanie spotkań informacyjnych, wizyty studyjne na obszarze planowanej inwestycji oraz prowadzenie kampanii promocyjnych i popularyzacyjnych.

Czynniki polityczne odnoszą się do podejmowania strategicznych decyzji dotyczących lokalizacji podziemnych obiektów, zwłaszcza oddziałujących w skali kraju i relacjach międzynarodowych (np. lokalizacja strategicznych magazynów gazu zapewniających bezpieczeństwo energetyczne Polsce i Europie). Czynniki te wynikają głównie z zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, rozumianego w kategoriach politycznych (Kochanek, 2007; Brańka, 2009), realizacji polityk i strategii krajowych, kierunków rozwoju Unii Europejskiej, światowych wyzwań i problemów dotyczących globalnego ocieplenia klimatu i walki z jego skutkami, realizacji celów zrównoważonego rozwoju, możliwości powstania zagrożeń dla dostępu do źródeł energii, dróg transportowych, urządzeń przetwarzających energię oraz wynikających z konfliktów politycznych i działań wojennych (Kaliski i in., 2010, 2013).

Czynniki administracyjno-prawne obejmują problematykę dotyczącą m.in.: spełnienia prawnych wymagań co do lokalizacji podziemnego obiektu (patrz: cz. I, rozdz. 8.2), struktury własnościowej, możliwości nabycia praw do nieruchomości oraz do przestrzeni podziemnej, zgodności potencjalnej lokalizacji z ustaleniami miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego lub innych dokumentów planistycznych, uzgodnień administracyjnych oraz uzyskania pozwoleń i decyzji na prowadzenie prac i działalności gospodarczej (Marcak, Pilecki, 1998; Wójcicki, Nagy, 2014). Grupa ta obejmuje czynniki wykluczające lokalizację podziemnego obiektu wynikające z przepisów prawa.

4.1. GEOLOGICZNE CZYNNIKI LOKALIZACJI OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

Geologiczne czynniki lokalizacji podziemnych magazynów substancji i podziemnych składowisk odpadów stanowią kluczową grupę czynników mających wpływ na wybór optymalnej lokalizacji obiektu podziemnego, gdyż decydują o wyborze struktury. Grupa ta dotyczy szerokiej problematyki w zakresie uwarunkowań geologicznych, w tym parametrów rozpoznania struktury oraz warunków górniczych. Obejmuje następujące zagadnienia, które powinny być rozpoznane na różnych etapach procesu inwestycyjnego[17]:

- warunki geomorfologiczne;
- warunki geologiczno-strukturalne i geodynamiczne;
- warunki geologiczno-złożowe;
- warunki hydrogeologiczne;
- warunki geotermalne;
- warunki geomechaniczne;
- warunki geologiczno-inżynierskie;
- warunki górnicze (geologiczno-górnicze).

Wybrane czynniki geologiczne lokalizacji obiektów podziemnych zebrano w tabeli 10.

Czynniki te, wykorzystywane do charakterystyki lokalizacji oraz na potrzeby opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (patrz: cz. II), są bardzo zróżnicowane i zależą przede wszystkim od rodzaju struktury/formacji przeznaczonej na podziemny magazyn lub składowisko.

W literaturze analizowano różne czynniki geologiczne, przy czym autorzy najczęściej wskazują na następujące uwarunkowania[18]:

- w przypadku obiektów podziemnych w strukturach naturalnych istotna jest analiza warunków geologiczno-strukturalnych; obiekt podziemny musi być dostosowany do istniejących uwarunkowań geologiczno-złożowych, a zmiany tych warunków są możliwe w bardzo ograniczonym zakresie;
- w przypadku obiektów podziemnych w wyrobiskach górniczych istotną rolę przy wyborze lokalizacji odgrywają warunki górnicze, ze względu na ograniczenia wynikające m.in. z możliwości wykonania wyrobisk górniczych czy przepustowości szybów, chodników, odwiertów i instalacji przesyłowych.
- ważny jest dobór odpowiednich warunków pracy obiektu podziemnego, uwzględniający specyfikę struktury,

[17] Wybrane pozycje literatury: Marcak, Pilecki, 1998; Ślizowski K., 1998; Reinisch, 2000; Kidybiński, 2004; Ślizowski K. i in., 2004; Kłeczek, Zeljaś, 2005; Macuda, Zawisza 2006; Siemek, Nagy, 2007; Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2007; Maciejewski, 2008; Kunstman i in., 2009; Tarkowski i in., 2009a, b; Laskowska i in., 2009; Pieńkowski, 2009, Ślizowski J., Urbańczyk, 2011, Gąska i in., 2012; Kaliski, Sikora, 2013; Lankof i in., 2013; Poborska-Młynarska, 2013; Wójcicki, Nagy, 2014; Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016; Lewandowska-Śmierzchalska, 2016; Tarkowski, 2017; Czapowski, 2019; Matos i in., 2019; Tarkowski, 2019.

[18] Wybrane pozycje literatury: Molenda, 1996; Reinisch, 2000; Kidybiński, Siemek, 2006; Michałowski, Trzop, 2006; Kaliski i in., 2010; Woźniak, Zawisza, 2011; Gąska i in., 2012; Tarkowski, 2017.

w tym jej pojemność, a w przypadku magazynowania/składowania płynów – dobór odpowiedniego ciśnienia zatłaczania i odbioru medium, tak żeby nie przekroczyć ciśnienia szczelinowania górotworu i nie doprowadzić do jego rozszczelnienia; wartość ciśnienia szczelinowania można określić z wzorów uwzględniających minimalne i maksymalne naprężenia poziome, wartość ciśnienia porowego oraz wytrzymałość na rozciąganie;
– jednym z podstawowych czynników lokalizacji obiektów podziemnych w strukturach naturalnych jest szczelność geologiczna, którą, w zależności od struktury i rodzaju obiektu, zapewnia nadkład, otoczenie i bariera geologiczna charakteryzujące się dobrymi właściwościami izolacyjnymi.

Należy podkreślić, że równie ważna jest szczelność techniczna, czyli hermetyczność wykonanych otworów, szybów, chodników, komór, urządzeń podziemnych i powierzchniowych, w tym infrastruktury przesyłowej, transportowej, komunikacyjnej.

Czynniki geologiczne ustala się na podstawie przeglądu materiałów archiwalnych, wyników badań geologiczno-inżynierskich, geomechanicznych, geofizycznych, hydrogeologicznych, geochemicznych i innych oraz wyników modelowania i analiz górniczych.

Tabela 10

Wybrane czynniki geologiczne niezbędne do rozpoznania przy ocenie lokalizacji obiektu podziemnego

Czynniki geologiczne	Charakterystyka czynników geologicznych
Warunki geomorfologiczne	ukształtowanie powierzchni terenu, historia przekształceń powierzchni terenu, procesy i zjawiska erozji powierzchniowej, spadki i deniwelacje terenu (dotyczą części naziemnej obiektu podziemnego)
Warunki geologiczno-strukturalne i geodynamiczne	historia i stopień rozpoznania budowy geologicznej, sposób ułożenia i następstwo występowania warstw skał, ich wykształcenie petrograficzne, mineralogiczne, litologiczne oraz wiek (stratygrafia) i geneza, kształt i tektonika struktury geologicznej oraz otaczającego górotworu, rozciągłość, miąższość i położenie głębokościowe struktury geologicznej obejmujące warstwy izolujące i zbiornikowe oraz otaczającego górotworu, jednorodność i zmienność w obrębie struktury geologicznej oraz procesy i zjawiska tektoniczne (np. tereny zaangażowane glacitektonicznie, rozwarstwienia, foliacje, fałdy, uskoki, strefy ścięć, spękań i zeszczelinowacenia), procesy i zjawiska sejsmiczne (np. naturalne i indukowane wstrząsy sejsmiczne, osiadanie/podnoszenie terenu na skutek współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej)
Warunki geologiczno-złożowe	stan i sposób rozpoznania złoża lub stan i sposób eksploatacji złoża (w przypadku złóż eksploatowanych lub wyeksploatowanych), charakterystyka geologiczna złoża (położenie, forma, kształt, sposób ułożenia, wiek i rodzaj utworów budujących i otaczających złoże, rodzaj nadkładu, tektonika, strefowość złoża, ciśnienie złożowe), możliwe zagrożenia (tąpnięcia, gazowe, pyłowe, wodne i in.), występowanie i charakterystyka podziemnych wyrobisk górniczych powstałych w wyniku wydobycia kopalin (w przypadku wyeksploatowanych wyrobisk górniczych)
Warunki hydrogeologiczne	rozciągłość i głębokość występowania poziomów wodonośnych, charakter zwierciadeł wód podziemnych, rodzaj i wysokość ciśnień, warunki krążenia wód podziemnych (np. charakter, dynamika i kierunki przepływu wód podziemnych, związki hydrauliczne poziomów wód podziemnych), procesy i zjawiska hydrogeologiczne istotne w pracy obiektu podziemnego, warunki geochemiczne (np. stopień mineralizacji wód podziemnych, oddziaływania geochemiczne i biologiczne zachodzące na kontakcie skała–substancja/odpad, woda złożowa–substancja/odpad)
Warunki geotermalne	zmiany temperatury wraz z głębokością (gradient termiczny), rozkład temperatury w strukturze i jej zmienność, wpływ temperatury na możliwość magazynowania/składowania
Warunki geomechaniczne	procesy i zjawiska związane ze zmianami naprężenia górotworu, zmianami ciśnienia górotworu, w tym ciśnienia złożowego (piezometrycznego), zakres ciśnień szczelinowania, geomechaniczna reakcja struktury, uszczelnienia i otaczającego górotworu na zmiany ciśnień i naprężeń w wyniku pracy obiektu podziemnego oraz wprowadzanej substancji/odpadu, reakcja na cykliczne zmiany związane z zatłaczaniem i wydobyciem (rozciąganie–ściskanie masywu skalnego, głównie w przypadku magazynowania), geomechaniczna stabilność wyrobisk górniczych (np. konwergencja)
Warunki geologiczno-inżynierskie	charakterystyka wydzielonych serii i warstw geologiczno-inżynierskich, właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów i skał oraz ich zmienność w obrębie struktury geologicznej i otaczającego górotworu (np. skały podatne na pęcznienie, skurcz, rozmakanie, erozję wgłębną, krasowienie, wietrzenie), niekorzystne procesy i zjawiska geologiczne powodujące niestabilność struktury i terenu lokalizacji (np. zagrożenie występowaniem lub występowanie zjawisk i procesów krasowych, wietrzeniowych, erozji, zwłaszcza wgłębnej, pęcznienia, deformacji filtracyjnych, powierzchniowych ruchów masowych ziemi, osiadania, zapadania terenu i in.), ocena szczelności geologicznej, geologiczno-inżynierska ocena przydatności lokalizacji do budowy obiektu podziemnego
Warunki górnicze (geologiczno-górnicze)	warunki wpływające na sposób prowadzenia i zakończenia eksploatacji, bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji, ustalona optymalna lokalizacja obiektu w górotworze, w tym optymalna strefa złoża do magazynowania/składowania, warunki pracy obiektu, geometria (wymiary) i pojemność przestrzeni przeznaczonej do magazynowania/składowania, liczba poziomów magazynowania/składowania, wymiary i odległości między polami eksploatacyjnymi a wyrobiskami górniczymi przeznaczonymi do magazynowania/składowania, wymiary wyrobisk udostępniających, wymiary i rozkład szybów (zjazdowych, wentylacyjnych, komunikacyjnych, transportowych i in.), wymiary i rozkład filarów bezpieczeństwa, filarów ochronnych, czas eksploatacji, ocena stanu istniejących wyrobisk górniczych

Geologiczne czynniki lokalizacji obiektów podziemnych obejmują uwarunkowania geologiczne lokalizacji, w tym warunki złożowe i górnicze, które umożliwiają charakterystykę i ocenę formacji/struktury przewidzianej na podziemny magazyn/składowisko oraz określenie warunków pracy obiektu podziemnego. Stanowią grupę czynników wymagających kompleksowego przedstawienia m.in. w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Na ich podstawie dokonuje się oceny lokalizacji w odniesieniu do ustalonych kryteriów wyboru.

Z uwagi na cel poradnika, ustalenie zasad dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich, opierając się na danych literaturowych[19], w podziale na rodzaj struktury/formacji przeznaczonej na obiekt podziemny, wskazano istotne do rozpoznania geologiczne czynniki lokalizacji obiektów podziemnych.

W przypadku obiektów podziemnych w formacjach porowatych/szczelinowatych w literaturze wskazano następujące czynniki geologiczne istotne do rozpoznania przy wyborze lokalizacji[20]:

- **Rodzaj i cechy struktury geologicznej.** Struktura powinna się składać z warstwy zbiornikowej (kolektora) odizolowanej od otaczającego górotworu, co najmniej w stropie, warstwą uszczelniającą.
- **Szczelność geologiczna struktury.** Powinna być sprawdzona i udokumentowana na podstawie badań oraz dostępnych danych archiwalnych. W przypadku obiektów w formacjach złóż węglowodorów jest ona zazwyczaj zapewniona z uwagi na występowanie złoża potwierdzającego szczelność obiektu, natomiast w przypadku formacji wodonośnych szczelność ta może być wątpliwa i wymagać dokładnego zbadania oraz rozpoznania.
- **Cechy warstwy uszczelniającej (warstw uszczelniających).** Warstwy uszczelniające powinny być ciągłe zarówno w poziomie, jak i w pionie, mieć miąższość, która uniemożliwia rozszczelnienie struktury z uwagi na zwiększone ciśnienie zatłaczania oraz ciśnienie szczelinowania, być zbudowane ze skał o odpowiednich właściwościach izolacyjnych zapewniających szczelność geologiczną struktury.
- **Cechy warstwy zbiornikowej (kolektora).** Warstwa zbiornikowa powinna mieć miąższość i rozprzestrzenienie umożliwiające magazynowanie/składowanie zakładanych ilości substancji/odpadów, powinna występować na głębokości, która zapewni optymalne warunki do magazynowania/składowania, być zbudowana ze skał jednorodnych i mających właściwości filtracyjne (porowatość, przepuszczalność), które umożliwią przepływ zatłaczanych mediów.
- **Zawodnienie górotworu oraz ciśnienie piezometryczne (złożowe) wód podziemnych (złożowych) w warstwie zbiornikowej.** Czynniki te mają wpływ na ustalanie zakresu ciśnień roboczych oraz warunki pracy obiektu podziemnego.
- **Warunki przepływu zatłaczanych mediów w warstwie zbiornikowej.** Przy ustalaniu warunków przepływu w warstwie zbiornikowej należy wziąć pod uwagę: warunki geologiczne zalegania warstwy zbiornikowej, efektywną porowatość/szczelinowatość, ściśliwość przy stosowanym ciśnieniu zatłaczania, chłonności kolektora, temperaturę wód podziemnych w kolektorze oraz temperaturę substancji/odpadów wtłaczanych do kolektora, skład chemiczny wód podziemnych oraz substancji/odpadów, procesy i reakcje chemiczne zachodzące w efekcie ich mieszania, obecność w substancjach/odpadach części stałych, koloidów lub bakterii, które mogą powodować kolmatację i negatywnie oddziaływać na właściwości filtracyjne kolektora lub powodować niekorzystne zmiany w składzie magazynowanego/składowanego medium.
- **Oddziaływania geochemiczne.** Konieczne jest ustalenie zgodności chemicznej wód podziemnych z wtłaczanymi substancjami/odpadami, z uwagi na możliwość zachodzenia niepożądanych reakcji, takich jak wytrącanie części stałych lub tworzenie się koloidów. Istotna jest również charakterystyka strefy kontaktu zatłaczanych substancji/odpadów z górotworem, gdzie może dochodzić do procesów rozpuszczania niektórych minerałów ze skał, jak też wytrącania się minerałów z zatłaczanego medium. Należy również scharakteryzować właściwości geochemiczne decydujące o niekorzystnych procesach, takie jak: temperatura, ciśnienie, stężenie jonów wodorowych (pH), potencjał utleniająco-redukcyjny (Eh), zawiesiny, zasolenie, zawartość żelaza, manganu, siarczanów, azotu, tlenu i siarkowodoru.
- **Warunki geotermalne.** Należy ustalić gradienty temperatury, które w danej lokalizacji nie są stałe z głębokością, zmieniają się w zależności od przewodności cieplnej skał oraz (w mniejszym stopniu) z powodu

[19] Wybrane pozycje literatury: Pitiewa, 1976; Kijewski, Kłeczek, 1998; Marcak, Pilecki, 1998; Ślizowski K., 1998, 2001; Reinisch, 2000; Kunstman i in., 2002, 2009; Galiniak, 2004; Kidybiński, 2004; Ślizowski K. i in., 2004, 2006, 2009; Kłeczek, Zeljaś, 2005; Tarkowski, 2005, 2017, 2019; Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2005, 2007; Janoha, Kluk, 2006; Kidybiński, Siemek 2006; Macuda, Zawisza, 2006; Pozzi, Mzyk, 2007; Sadowski i in., 2007; Siemek, Nagy, 2007; Ślizowski J. i in., 2007, 2011; Tarkowski, Stopa, 2007; Chadwick i in., 2008; Maciejewski, 2008; Laskowska i in., 2009; Lewkiewicz-Małysa, Konopka, 2009; Lewkiewicz-Małysa, Pieńkowski, 2009; Tarkowski i in., 2009a, b; Wind, 2009, 2011; Wójcicki, 2009; Dubiński i in., 2010; Kaliski i in., 2010; Papiernik, Michna, 2010; Szott, 2010; Bieniasz i in., 2011; Ślizowski J., Urbańczyk, 2011; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Gąska i in., 2012; Marczak, 2012; Kaliski, Sikora, 2013; Lankof i in., 2013; Poborska-Młynarska, 2013; Wójcicki i in., 2013; Dubiński, Koteras, 2014; Wójcicki, Nagy, 2014; Serbin i in., 2015; Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016; Urbańczyk, 2016, 2017, 2018; Lankof, 2018; Czapowski, 2019; Król, Kuśnierz, 2019; Matos i in., 2019.

[20] Wybrane pozycje literatury: Pitiewa, 1976; Kijewski, Kłeczek, 1998; Ślizowski K., 1998, 2001; Reinisch, 2000; Kłeczek, Zeljaś, 2005; Tarkowski, 2005, 2017, 2019; Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2005, 2007; Janoha, Kluk, 2006; Macuda, Zawisza, 2006; Tarkowski, Stopa, 2007; Chadwick i in., 2008; Lewkiewicz-Małysa, Konopka, 2009; Lewkiewicz-Małysa, Wind, 2009, 2011; Tarkowski i in., 2009a, b; Wójcicki, 2009; Dubiński i in., 2010; Kaliski i in., 2010; Papiernik, Michna, 2010; Woźniak, Zawisza, 2011; Gąska i in., 2012; Wójcicki i in., 2013; Dubiński, Koteras, 2014; Matos i in., 2019.

produkcji ciepła radiogenicznego (np. łupki ilaste, sole potasowe), co powoduje zachwianie równowagi termicznej.

– **Warunki geologiczno-górnicze.** Konieczne jest wyznaczenie tzw. optymalnej strefy sczerpanego złoża węglowodorów, która jest najbardziej korzystna do zlokalizowania obiektu podziemnego. Strefa ta jest ustalana na podstawie obserwacji i pomiarów prowadzonych podczas eksploatacji złoża, które umożliwiają wydzielenie obszarów złoża różniących się zdolnością wydobywczą i warunkami eksploatacji.
– **Parametry warstwy zbiornikowej.** Chłonność i pojemność decydują o możliwości podziemnego magazynowania/składowania w strukturach porowatych/szczelinowatych oraz mają wpływ na uwarunkowania techniczne i ekonomiczne inwestycji. Chłonność warstwy zbiornikowej, która odpowiada za ilości substancji/odpadu jaką można wtłoczyć do kolektora o znanej miąższości w ciągu doby, zależy od wielu parametrów i cech, w tym m.in. od: porowatości, szczelinowatości, kawernistości, przepuszczalności, niejednorodności skał kolektora, a także obecności drobnych cząstek w zatłaczanym medium i od jego składu chemicznego. Na pojemność warstwy zbiornikowej, rozumianej jako zdolność do gromadzenia określonej ilości substancji/odpadu, ma wpływ m.in.: miąższość i rozprzestrzenienie kolektora, jego porowatość, przepuszczalność, chłonność i ciśnienie złożowe oraz niejednorodność związana z występowaniem w kolektorze skał zmniejszających pojemność.

W odniesieniu do obiektów podziemnych w komorach solnych w wielu pozycjach literatury wskazano poniższe czynniki geologiczne jako istotne do rozpoznania przy wyborze lokalizacji[21]:

– **Cechy złoża soli.** Opis złoża powinien obejmować przede wszystkim kształt, miąższość i głębokość jego zalegania. Cechy te decydują o możliwości wyługowania komór solnych lub przystosowania istniejących komór na podziemny magazyn/składowisko.
– **Właściwości górotworu solnego.** Górotwór solny powinien być zbudowany z soli kamiennej mającej bardzo dobre właściwości do budowy komór solnych, do których należą: duża wytrzymałość na ściskanie, zdolność do deformacji ciągłych i odkształceń plastycznych (pełzanie), zdolność do samoczynnego zaciskania szczelin, bardzo niska przepuszczalność, dobre właściwości ługownicze, obojętność chemiczna wobec węglowodorów (nie wykazuje z nimi żadnej reaktywności chemicznej czy rozpuszczalności), dobre właściwości cieplne.
– **Szczelność geologiczna struktury.** Powinna być sprawdzona i udokumentowana na podstawie badań oraz dostępnych danych archiwalnych. W przypadku obiektów w strukturach solnych jest ona zazwyczaj zapewniona przez górotwór solny. Szczelność geologiczna zależy od budowy geologicznej złoża soli, m.in. od ułożenia warstw, formy, wielkości i głębokości zalegania złoża.
– **Szczelność komór solnych.** Szczelność ta jest zapewniona przez górotwór solny z uwagi na jego właściwości izolacyjne i geomechaniczne. Szczelność wyługowanych komór solnych zależy od budowy geologicznej złoża, m.in. od stopnia czystości i właściwości reologicznych soli.
– **Ługowanie.** Oceniając możliwość zastosowania technologii ługowania do formowania komór solnych, należy przeanalizować wiele aspektów, w tym m.in.: dostępność wody potrzebnej do ługowania, możliwość odprowadzenia solanki, cechy budowy geologicznej złoża soli umożliwiające ługowanie. Wyługowanie komór jest możliwe, gdy złoże soli ma odpowiednią miąższość i kształt, zalega na odpowiedniej głębokości, ma odpowiednią budowę wewnętrzną, skład litologiczny, jednorodność oraz dobre właściwości ługownicze. Właściwości ługownicze umożliwiają ocenę podatności skał solnych na ługowanie i obejmują takie cechy skał solnych jak: rozpuszczalność minerałów wchodzących w skład skały, struktura i tekstura skały, ilość i formy występowania domieszek nierozpuszczalnych, zawartość inkluzji i gazonośność.
– **Warunki geologiczno-górnicze.** Warunki górnicze obejmują ustalenie głębokości posadowienia komór solnych oraz ich rozstaw w strukturze solnej, co ma wpływ na ich bezpieczną eksploatację. Na głębokość posadowienia komór solnych ma wpływ zakres ciśnień roboczych oraz tempo konwergencji ustalane dla każdej komory solnej oddzielnie. Rozstaw komór solnych jest uzależniony od wielu czynników, w tym m.in. od: głębokości występowania, formy i wielkości złoża, jego jednorodności, właściwości fizyczno-mechanicznych, rodzaju gromadzonej substancji/odpadu, grubości filarów ochronnych oraz filarów i półek bezpieczeństwa.
– **Parametry komór solnych.** Parametry te są określane dla każdej komory indywidualnie. Obejmują m.in.: szczelność, stateczność geomechaniczną, wysokość, średnice, kształt, pojemność efektywną, zakres ciśnień roboczych, temperaturę, wydajność zatłaczania oraz wydobycia w przypadku magazynowania. Parametry komór solnych zależą o wielu czynników, które należy uwzględniać przy ich projektowaniu. Wysokość komór solnych – zależy od miąższości pokładu soli, a w przypadku wysadów i poduszek solnych od kształtu tych struktur. Średnica komór solnych – zależy przede wszystkim od jednorodności, rozprzestrzenienia złoża soli oraz od kształtu struktury. Kształt komór solnych – powinien być regularny, zgodny z projektem, tak żeby zapobiegać konieczności podwyższania minimalnego ciśnienia roboczego i zmniejszania pojemności komory. Pojemność efektywna komór solnych – zależy od kształtu, wysokości i średnicy komory solnej oraz

[21] Wybrane pozycje literatury: Ślizowski J. i in., 2007, 2011; Galiniak, 2004; Kunstman i in., 2009; Pieńkowski, 2009; Ślizowski K. i in., 2009; Serbin i in., 2015; Lankof, 2018; Czapowski, 2019; Król, Kuśnierz, 2019; Matos i in., 2019.

tempa konwergencji. Zakres ciśnień roboczych komór solnych – zależy od głębokości występowania, formy i wielkości złoża, jego jednorodności, właściwości fizyczno-mechanicznych oraz rodzaju gromadzonej substancji/odpadu, a także od grubości filarów ochronnych oraz filarów i półek bezpieczeństwa. Minimalne ciśnienie pracy komory zależy od wytężenia górotworu w jej otoczeniu, wielkości naprężeń powstających na konturze komory oraz tempa konwergencji. Maksymalne ciśnienie pracy komory nie może być większe niż ciśnienie szczelinowania oraz ciśnienie pierwotne panujące w górotworze z uwagi na zapewnienie szczelności komór.

– **Stateczność geomechaniczna komór solnych.** Stateczność geomechaniczna komór solnych jest zapewniona przez górotwór solny z uwagi na jego właściwości geomechaniczne i reologiczne. Na stateczność geomechaniczną komór solnych wpływ mają przede wszystkim zmiany stanu naprężeń oraz deformacje komory.
– **Konwergencja komór solnych.** Konwergencja (zaciskanie komory na skutek pełzania górotworu) i jej tempo ma duży wpływ na pojemność komór solnych oraz ich stateczność. Oceniając tempo konwergencji, należy uwzględnić właściwości reologiczne i temperaturę górotworu solnego, różnicę ciśnień pierwotnych i roboczych, a także zakres zmian ciśnienia roboczego mogącego zminimalizować proces konwergencji (zaciskania komór).

Dla obiektów podziemnych w komorach skalnych i w wyrobiskach kopalń podziemnych w literaturze wskazano niżej wymienione czynniki geologiczne jako istotne do rozpoznania przy wyborze lokalizacji [22]:

– **Rodzaj i cechy struktury geologicznej.** Opis struktury geologicznej powinien uwzględniać cechy formacji skalnej słaboprzepuszczalnej, które decydują o możliwości lokalizacji podziemnych obiektów w komorach skalnych. Do najważniejszych cech formacji skalnej należą głębokość zalegania, miąższość i wykształcenie litologiczne oraz właściwości masywu skalnego. Formacja skalna powinna być jednolita, pozbawiona przewarstwień oraz cech strukturalnych, które wpływają na wzrost jej przepuszczalności i zmniejszają jej wytrzymałość oraz stateczność. Masyw skalny powinien być praktycznie niespękany, pozbawiony stref: osłabienia, deformacji tektonicznych, wietrzenia i mineralizacji, powinien być dobrze urabialny, łatwo dostępny i praktycznie pozbawiony miąższych warstw wodonośnych utrudniających np. drążenie szybów. Formacja skalna z uwagi na stabilność komór skalnych/wyrobisk kopalń, powinna występować w możliwie zwięzłym górotworze, w oddaleniu od większych nieciągłości (uskoki, strefy intensywnego i nieregularnego uławicenia itp.) oraz aktywnych stref uskokowych, a także stref potencjalnej aktywności sejsmicznej, w tym indukowanej.
– **Właściwości formacji skalnych słaboprzepuszczalnych.** Formacje skalne powinny charakteryzować się niską porowatością i niską przepuszczalnością, tak żeby zminimalizować dopływ wód podziemnych do komór skalnych/wyrobisk kopalń oraz zminimalizować możliwość wycieku substancji/odpadów z podziemnego obiektu podczas jego pracy. Formacje skalne powinny być zbudowane z praktycznie nieprzepuszczalnych, twardych i wytrzymałych skał, które pozwalają na wykonanie pojemnych komór skalnych lub przystosowanie wyrobisk kopalń na obiekt podziemny.
– **Szczelność geologiczna struktury.** Powinna być sprawdzona i udokumentowana na podstawie badań oraz dostępnych danych archiwalnych. Może być zapewniona przez występowanie naturalnej izolacji pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi a formacją skalną lub poprzez strefy ochronne i filary bezpieczeństwa zatrzymujące napływ wód podziemnych do komór skalnych/wyrobisk kopalń z otaczających warstw wodonośnych.
– **Szczelność komór skalnych/wyrobisk kopalń.** Musi być zapewniona przez pionowe i poziome uszczelnienie. Komory skalne/wyrobiska kopalń lokalizuje się w formacjach skalnych w taki sposób, żeby nie miały kontaktu z innymi kopalniami oraz były zaizolowane warstwami uszczelnienia w stropie i spągu. Takie podejście ma na celu zapobieganie potencjalnemu zawodnieniu komór skalnych/wyrobisk kopalń, które mogłoby spowodować zagrożenie wodne oraz trudności techniczne i technologiczne podczas eksploatacji.
– **Warunki wodne.** Mają duży wpływ na warunki pracy obiektu podziemnego oraz jego lokalizację. W stropie i spągu formacji skalnej nie powinny występować warstwy wodonośne o dużej przepuszczalności i wysokim ciśnieniu piezometrycznym. W przypadku magazynów substancji w stanie gazowym i ciekłym, formacje skalne powinny występować w strefie nasyconej wodą, gdzie ciśnienie hydrostatyczne wód podziemnych jest równe lub nieznacznie wyższe od ciśnienia przechowywanej substancji. Taka sytuacja zapobiega przedostawaniu się substancji zgromadzonej w magazynie na zewnątrz obiektu podziemnego.
– **Oddziaływania geochemiczne i warunki geotermalne.** Konieczne jest ustalenie procesów i zjawisk zachodzących pod wpływem zmian temperatury, obecności tlenu lub wody powodujących wietrzenie i mających wpływ na stabilność komór skalnych/wyrobisk kopalń.
– **Ocena masywu skalnego.** Powinna obejmować opis spękania oraz prognozę rozwoju procesów pękania masywu skalnego. Ocena ta stanowi podstawę do analizy przydatności formacji skalnej/wyrobisk kopalń na

[22] Wybrane pozycje literatury: Marcak, Pilecki, 1998; Reinisch, 2000; Kidybiński, 2004; Ślizowski K. i in., 2004; Kidybiński, Siemek 2006; Pozzi, Mzyk, 2007; Sadowski i in., 2007; Siemek, Nagy, 2007; Bieniasz i in., 2011; Lankof i in., 2013; Poborska-Młynarska, 2013; Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016; Matos i in., 2019.

obiekt podziemny. Przy ocenie masywu skalnego należy uwzględnić:
  - wielkość naprężeń powodujących powstawanie stref odkształceń plastycznych;
  - obecność wody w porach, które wpływają na zmianę wytrzymałości skał na pękanie;
  - temperaturę skał, której zmiany przyspieszają proces pękania;
  - wtórne pola naprężeń związane ze strefami zaburzeń tektonicznych i litologicznych powodujące zmiany w rozkładzie i prędkości powstawania odkształceń niesprężystych.
- **Warunki geologiczno-górnicze.** Warunki górnicze decydują o możliwości lokalizacji podziemnych obiektów w wyrobiskach kopalń podziemnych. Obejmują wiele aspektów, w tym m.in.:
  - położenie i strukturę kopalni;
  - rodzaje wyrobisk;
  - systemy eksploatacji;
  - łączną objętość pustek (wyrobisk) oraz filarów i zrobów pozostawionych w kopalni;
  - masę kopaliny pozostawionej w złożu i jej właściwości;
  - stan i szczelność szybów;
  - możliwość oraz spodziewane koszty likwidacji szybów i otworów wiertniczych z powierzchni terenu;
  - cechy budowy geologicznej złoża oraz otaczającego górotworu;
  - warunki hydrogeologiczne, w tym dopływy wód podziemnych do wyrobisk oraz obecność wodonośnych skał porowatych/szczelinowatych w sąsiedztwie wyrobisk;
  - uwarunkowania tektoniczne złoża w aspekcie ewentualnych połączeń z sąsiednimi kopalniami lub powierzchnią terenu;
  - zasięgi stref spękania nad wyeksploatowanymi pokładami.
- **Parametry komór skalnych/wyrobisk kopalń.** Parametry te należy określać indywidualnie dla każdej komory/wyrobiska. Do podstawowych parametrów komór skalnych/wyrobisk kopalń zalicza się ich orientację, kształt i wymiary. Parametry te zależą od: pierwotnego stanu naprężeń, właściwości wytrzymałościowych skał, odprężania i odspajania skał, warunków koncentracji naprężeń wokół komory/wyrobiska, zwięzłości skał, położenia głównych płaszczyzn nieciągłości, występowania zagrożeń: sejsmicznych, metanowych, wodnych, wyrzutów gazów i skał.
- **Konwergencja komór skalnych/wyrobisk kopalń.** Konwergencja powoduje zmniejszanie pojemności komór skalnych/wyrobisk kopalń. Konwergencja i jej zmienność zależą od głębokości położenia i wielkości przekroju poprzecznego komór skalnych/wyrobisk kopalń, rodzaju skał oraz oddziaływania sąsiadującej eksploatacji.
- **Ocena stanu istniejących komór skalnych/wyrobisk kopalń.** Ocena ta dotyczy ich długoterminowej stateczności geomechanicznej i szczelności. W ocenie należy uwzględnić takie zagadnienia jak: zmniejszanie wytrzymałości i sztywności masywu skalnego na skutek wykonania komór skalnych/zagospodarowania wyrobisk kopalń, czas funkcjonowania obiektu podziemnego, a także narażenie na skutki zachodzących niekorzystnych procesów geomechanicznych, geochemicznych i termicznych.

4.2. KRYTERIA OCENY LOKALIZACJI OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

Analiza czynników lokalizacji wymaga ustalenia kryteriów ich oceny. Kryteria oceny lokalizacji stanowią zbiór ilościowych i jakościowych wskaźników/parametrów, które warunkują możliwość realizacji inwestycji i służą do porównania wszystkich potencjalnych lokalizacji na takich samych zasadach oraz według takiej samej metodyki w celu wyboru opcji optymalnej.

Jak wynika z rozdziału 4.1, czynniki wpływające na wybór lokalizacji obejmują szeroki zakres zagadnień niezbędnych do uwzględnienia. Ich charakterystyka ma naturę ogólną, określającą przyrodnicze (geologiczne i środowiskowe) oraz technologiczne uwarunkowania. Dla konkretnego obiektu muszą być przyjęte szczegółowe określenia tych czynników, ustalone na podstawie kryteriów parametrycznych w danej formacji geologicznej.

Opisane w literaturze wybrane przykłady kryteriów oceny lokalizacji obiektów podziemnych poddano syntezie i zestawiono w tabelach 11–20. W efekcie powstał zbiór kryteriów parametrycznych przydatnych w analizach porównawczych lokalizacji obiektów podziemnych.

Geologiczne kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w formacjach porowatych/szczelinowatych (z wyłączeniem kompleksów składowania CO_2)

Podstawowe czynniki i kryteria geologiczne, które powinna spełniać lokalizacja obiektu podziemnego w formacjach porowatych/szczelinowatych dotyczą trzech elementów[23]: struktury geologicznej, warstwy zbiornikowej (kolektora) oraz warstwy izolującej (uszczelniającej). Należy podkreślić, że każda lokalizacja obiektu podziemnego w formacjach porowatych/szczelinowatych, wymaga osobnego rozpoznania cech geologicznych, a w przypadku obiektów podziemnych w formacjach złóż węglowodorów, także znajomości przebiegu jego eksploatacji. W tabeli 11 zestawiono kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w formacjach porowatych/szczelinowatych zebrane na podstawie przeglądu literatury oraz informacje z funkcjonujących w kraju obiektów podziemnych.

[23] Lewandowska-Śmierzchalska, 2016; Matos i in., 2019; **składowiska CO_2:** Bachu, 2000, 2003; Chadwick i in., 2008; Kaldi, Gibson-Poole, 2008; IEA GHG, 2009; Best Practicies, 2017; **podziemne składowiska odpadów:** Johnson, 1980; Drury, 1998; Ślizowski K., 1998, 2002; Ślizowski K. i in., 2004; Macuda, Zawisza, 2006; Lewkiewicz-Małysa, Winid, 2009; Brasser, 2010; **podziemne magazyny gazu:** Katz, Tek, 1981; Bennion i in., 2000; Reinisch, 2000; Evans, 2007; Okwananke i in., 2011.

Tabela 11

Kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w formacjach porowatych/szczelinowatych (nie dotyczy kompleksów składowania CO_2)

Czynniki lokalizacji	Kryteria oceny lokalizacji						
	Matos i in., 2019 (magazyny energii)	Ślizowski K., 1998 (składowiska odpadów w stanie gazowym i ciekłym)			Reinich, 2000 (magazyny gazu)	Lewkiewicz-Małysa, Winid, 2009, 2011 (składowiska odpadów w stanie gazowym i ciekłym)	Funkcjonujące obiekty w kraju (mat. PIG-PIB)*
		warunki korzystne	warunki wystarczające	warunki nieprzydatne			
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Rodzaj struktury	antykliny, kopuły, zręby	[1), 2)] struktury hydrogeologiczne obejmujące otwarte poziomy przepuszczalne (wodonośne) całkowicie lub częściowo izolowane; [3)] wyczerpane złoża węglowodorów (pułapki podścielone wodą złożową z możliwością jej przepływu); [4)] struktury zamknięte: [4a)] słaboprzepuszczalne wkładki w kompleksie ilastym o ograniczonym rozprzestrzenieniu; [4b)] grube kompleksy skał ilastych nieprzepuszczalne; [4c)] sczerpane złoża węglowodorów w litologicznych pułapkach lub w strefach przegubów antyklin (bez możliwości przepływu wód złożowych zalegających poniżej złoża)			zamknięta pułapka: antyklina, struktura ograniczona litologicznie lub dyslokacyjnie od strony wzniesienia	struktury zamknięte: górne części antyklin, brzegi synklin lub ograniczone dobrze izolowane części masywów skalnych, rozległe masywy skalne (przeważnie szczelinowate lub kawerniste) izolowane od stropu i spągu skałami nieprzepuszczalnymi, rozległe przepuszczalne wkładki wśród masywów utworów ilastych	złoża warstwowe, antykliny, pułapki strukturalne
Rodzaj skał budujących warstwę porowatą (kolektor)	piaskowce, konglomeraty	[1), 2)] serie skalne przepuszczalne; [3a)] skały piaskowcowe, [3b)] skały węglanowe; [4a)] skały pylaste, [4b)] skały ilaste, [4c)] skały piaskowcowe i węglanowe			bardzo zróżnicowane piaskowce, kompleksy piaszczysto-ilaste i mułowcowo-piaszczyste, skały węglanowo-dolomityczne	utwory chłonne: min. chłonność ≥0,3 m^3/min/m przy ilości odpadów <10 000 m^3/rok	piaskowce miocenu i kredowo-oligoceńskie, dolomity i wapienie cechsztynu, wapienie turonu i kimerydu, piaskowce karbońskie
Głębokość występowania warstwy porowatej (kolektora)	200–2000 m	[1), 2)] 1000–2000 m	[1), 2)] 1000–2500 m [3a)] >800 m [3b)] >1000 m [4a)] >1500 m [4b), 4c)] >800 m	[1)] <1000; >2500 m [2)] <1000; >3000 m	1800 m 500–800 m	500–2000 m (dla min. ilości odpadów 10 000 m^3/rok)	380–2839 m
Miąższość warstwy porowatej (kolektora)	≥10 m	[1)] >50 m [2)] >30 m	[1)] 50–10 m [2)] 30–10 m [3a)] >10 m [3b)] >30 m [4a)] >5 m [4b)] >300 m [4c)] >25 m	[1), 2)] <10 m	≥20 m	10–18 m	8,7–66,5 m (średnia miąższość efektywna)
Porowatość warstwy porowatej (kolektora)	≥10%	[1)] >20% [2)] >15%	[1)] 20–10% [2)] 15–5% [3a)] >10% [3b)] >6% [4a)] >1,5% [4b)] n.d. [4c)] >8%	[1)] <10% [2)] <5%	wysoka	5–20%	3,65–20,60% (porowatość geofizyczna) 2,84–24,99% (porowatość laboratoryjna)

Tabela 11 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8
Przepuszczalność warstwy porowatej (kolektora)	>300 mD	1) >60 mD 2) >50 mD	1) 60–20 mD 2) 50–15 mD 3a) >40 mD 3b) >30 mD 4a) >2 mD 4b) n.d. 4c) >5 mD	1) <20 mD 2) <15 mD	wysoka >kilkuset mD	52–95 mD	0,3–270,9 mD (przepuszczalność geofizyczna) 0,09–1366 mD (przepuszczalność laboratoryjna)
Pojemność zbiornika (efektywna)	b.d.	1) >10 mln m^3 2) >3 mln m^3	1) 10–3 mln m^3 2) 3–1 mln m^3 3a) >5 mln m^3 3b) >7 mln m^3 4a), 4b) >10 tys. m^3 4c) >50 tys. m^3	1) <3 mln m^3 2) <1 mln m^3	b.d.	b.d.	30–1300 mln m^3
Ciśnienie piezometryczne (złożowe) w warstwie porowatej (kolektorze) [MPa] lub głębokość do zwierciadła wód podziemnych [m p.p.t.]	2–8 MPa	1), 2) >300 m p.p.t.	1),2) 300–10 m p.p.t.	1), 2) powyżej powierzchni terenu	ciśnienie robocze powinno przewyższać pierwotne ciśnienie złożowe ponad 20–25% lub więcej	ciśnienie zatłaczania nie może przewyższać ciśnienia szczelinowania górotworu	4,21–26,6 MPa (pierwotne)
Rodzaj skał budujących warstwy uszczelniające	łupki, mułowce, skały węglanowe	b.d.	b.d.	b.d.	skały ilaste	skały nieprzepuszczalne, masywy utworów ilastych	sole i anhydryty, iłowce, mułowce, łupki ilaste, wapienie, margle
Miąższość uszczelnienia poziomego w stropie struktury	≥6 m	b.d.	b.d.	b.d.	znaczna	musi zapewniać izolację warstw porowatych z uwzględnieniem zwiększonego ciśnienia zatłaczania $k_p < 1 \times 10^{-3}$ mD ($k_v < 1 \times 10^{-11}$ m/s)	10–600 m
Miąższość uszczelnienia pionowego struktury	≥10 m	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.

Tabela 11 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8
Szczelność geologiczna	b.d.	[1), 2)] całkowita	[1), 2)] możliwość kontaktu z przepuszczalną serią skalną w spągu; [3)] pułapki podścielone wodą złożową z możliwością jej przepływu; [4a)] zupełna; [4b)] cały kompleks ilasty szczelny; [4c)] wierzchołki antyklin szczelne od stropu	[1), 2)] możliwość kontaktu z nadległymi warstwami wodonośnymi	bez naruszeń tektonicznych	brak uskoków o znacznym lub nieznacznym zasięgu, brak aktywności sejsmicznej	b.d.

[1)] dla formacji skalnych (wodonośnych) na potrzeby podziemnego składowania dużych ilości płynnych odpadów o małej szkodliwości dla środowiska (solanki, wody kopalniane) do 250 tys. m^3/rok

[2)] dla formacji skalnych (wodonośnych) na potrzeby podziemnego składowania ciekłych odpadów o średniej szkodliwości dla środowiska w ilości do 100 tys. m^3/rok o odczynie obojętnym lub zasadowym dla wszystkich skał i odczynie kwaśnym z wyjątkiem skał węglanowych

[3)] dla sczerpanych złóż węglowodorów na potrzeby podziemnego składowania ciekłych odpadów o małej szkodliwości dla środowiska do 250 tys. m^3/rok: [3a)] skały piaskowcowe; [3b)] skały węglanowe

[4)] dla formacji skalnych na potrzeby podziemnego składowania płynnych odpadów niebezpiecznych dla środowiska w ilości do 1000 tys. m^3/rok: [4a)] słaboprzepuszczalne wkładki w kompleksie ilastym; [4b)] grube kompleksy ilaste nieprzepuszczalne zeszczelinowane pod wpływem ciśnienia szczelinującego; [4c)] sczerpane złoża węglowodorów w litologicznych pułapkach

* na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB)

n.d. – nie dotyczy; b.d. – brak danych

Geologiczne i techniczne kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w komorach solnych

Do oceny lokalizacji obiektu podziemnego w komorach solnych można przyjąć następujące kryteria geologiczne[24]:

- wielkość i miąższość struktury odpowiednia do uzyskania wymaganej objętości komór magazynowych;
- optymalna głębokość zalegania struktury, tak żeby koszt inwestycji był w pełni opłacalny;
- odpowiedni rodzaj skał budujących strukturę, w tym skład chemiczny soli;
- jednorodna struktura, bez większych domieszek skał nierozpuszczalnych, a także, co znacznie ważniejsze, bez domieszek skał łatworozpuszczalnych, np. soli potasowo-magnezowych;
- odpowiednia szczelność geologiczna zapewniona przez spokojną, niezaburzoną tektonicznie budowę geologiczną (wysady solne cechuje bardzo skomplikowana budowa wewnętrzna utrudniająca wykonanie wielu kawern);
- korzystne warunki hydrogeologiczne zapewnione przez brak lub niewielkie resztkowe zawodnienie struktury i skał otaczających.

Wykorzystanie do celów magazynowych poeksploatacyjnych komór solnych ma wiele zalet, natomiast narzuca liczne wymagania i ograniczenia w stosunku do projektowanych rozwiązań technicznych. W tym przypadku istotne kryteria techniczne, które należy określić i ocenić to (Jasiński i in., 2013):

- możliwość zagospodarowania produkowanej solanki;
- możliwości przekształcenia komór poeksploatacyjnych w kawerny magazynowe;
- zapewnienie długotrwałej stateczności (stabilności) górotworu;
- zapewnienie szczelności komór m.in. przez brak połączeń międzykomorowych w strefie magazynowania;
- zapewnienie szczelności otworów;
- zapewnienie braku „pułapek" na odpad/substancję o znacznej objętości.

Biorąc pod uwagę dostępną literaturę oraz doświadczenia krajowe, w tabeli 12 zestawiono najczęściej podawane geologiczne kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w komorach solnych.

Kryteria lokalizacji podziemnych magazynów substancji w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Do podstawowych kryteriów lokalizacji podziemnych magazynów substancji w komorach skalnych i w wyrobiskach kopalń podziemnych można zaliczyć (van Gessel i in., 2015; Matos i in., 2019):

- odpowiednio twarde skały, które umożliwią wykonanie komór o jak największej pojemności bez filarów wewnątrzkomorowych;
- skały o możliwie jak najniższej przepuszczalności, niespękane, jednorodne, uniemożliwiające wyciek;
- struktura geologiczna powinna być jednolita pod względem nieciągłości, praktycznie pozbawiona stref osłabień (np. uskoki, szczeliny, strefy fałdowania, wietrzenia czy mineralizacji), co wpływa na pojemność, stabilność geomechaniczną i szczelność komór/wyrobisk;
- nadkład najlepiej pozbawiony warstw wodonośnych, wymagających zastosowania specjalnych technik uszczelniających szyb;
- obszar pozbawiony aktywności tektonicznej i sejsmicznej – brak ryzyka uszkodzenia komór;
- korzystne warunki hydrogeologiczne, tj. położenie komór w całości w strefie nasyconej wodą (poniżej zwierciadła wód podziemnych), w której puste przestrzenie i szczeliny są wypełnione wodą; wykonanie magazynu może uniemożliwić: brak zawodnienia struktury geologicznej lub gdy na głębokości planowanego magazynu występuje ciśnienie hydrostatyczne wód podziemnych równe lub nieznacznie przekraczające ciśnienie przechowywanego płynu;
- zmiany chemiczne wód podziemnych spowodowane zmianami temperatury lub obecność tlenu w komorze, co może przyspieszyć proces niszczenia komory i doprowadzić do jej niestabilności;
- odpowiednie właściwości fizyczne skał, w tym niska porowatość i niska przepuszczalność, minimalizujące dopływ wód podziemnych podczas budowy i eksploatacji komór oraz minimalizujące wyciek płynu/powietrza z komory podczas eksploatacji,
- odpowiednie właściwości termiczne i mechaniczne skał, umożliwiające wykonanie komór i zapewnienie ich stabilności (trwałości).

W tabeli 13 podano geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych magazynów substancji w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych (Matos i in., 2019).

Z uwagi na uwarunkowania krajowe w tabeli 14 zestawiono kryteria lokalizacji podziemnych magazynów gazu w wyrobiskach kopalń węgla kamiennego (Kidybiński, 2004; Kidybiński, Siemek, 2006; Siemek, Nagy, 2007).

Należy podkreślić, że grupa kryteriów lokalizacji podziemnych magazynów substancji w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych jest bardzo zróżnicowana, co

[24] Wybrane pozycje literatury: Sedlacek, 1999; Kunstman i in., 2002, 2009; Bérest, Brouard, 2003; Kłeczek, Zeljaś, 2005; Kłeczek i in., 2005; Czapowski, 2006; Ślizowski J., 2006; Karnkowski, Czapowski 2007; Brańka, 2008, 2009; Maciejewski, 2008; Stopa i in., 2008; Evans, Chadwick, 2009; Pieńkowski, 2009; Ślizowski K., Lankof, 2009; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Jasiński i in., 2013; Chromik, 2015; Urbańczyk, 2016; Lankof, 2018; Czapowski, 2019; Matos i in. 2019.

Tabela 12

Wybrane geologiczne kryteria lokalizacji obiektów podziemnych w komorach solnych

Czynniki lokalizacji	Kryteria oceny lokalizacji							
	Matos i in., 2019 (magazyny energii)	Kłeczek, Zeljaś, 2005	Czapowski, 2006; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, 2019	Ślizowski J. i in., 2007	Chromik, 2015	Urbańczyk, 2016	Kunstman i in., 2009	Funkcjonujące obiekty w kraju (mat. PIG-PIB)
Rodzaj struktury	wysady solne, sole pokładowe	–	wysady solne, sole pokładowe	wysady solne, sole pokładowe	sole pokładowe	wysady solne, sole pokładowe	sole pokładowe, wysady solne	wysady solne, sole pokładowe
Rodzaj skał budujących strukturę	skały i formacje solne	sól kamienna	sól kamienna	–	–	–	sól kamienna bez zanieczyszczeń	sól kamienna cechsztyńska
Głębokość występowania formacji solnej	200–2000 m	1000–1300 m	kilkaset metrów–2000 m	1200–1400 m	–	715–1050 m	różna, zazwyczaj ok. 1500 m, rzadko głębiej	270–1675 m
Miąższość struktury	b.d.	min. 80–100 m	>100 m (sole pokładowe) kilkaset metrów (wysady solne)	–	–	–	min. 100 m – >1000 m	170–6000 m (głębokość rozpoznania wysadów solnych)
Skład chemiczny skał solnych	95% halit (NaCl)	–	–	–	–	–	–	80–100% NaCl
Rodzaj skał uszczelniających strukturę	anhydryt, gips, wapienie	–	–	–	–	–	–	iłowce, czapa anhydrytowo-gipsowo-ilasta
Wysokość komory (H)	ok. 300 m	–	–	–	–	74 – 146 m	–	120–250 m
Średnica komory (D)	ok. 70 m	–	–	2/3 wysokości	2/3 wysokości	–	–	45–70 m
Współczynnik wysokość do średnicy komory (H/D)	5 (typowa wartość)–20	–	–	–		–	–	b.d.
Odległość między komorami (S)	ok. 300 m	–	–	–	–	–	–	100–300 m (od osi)
Współczynnik odległość między komorami do średnicy komory (S/D)	>4 (typowa wartość); 2–10	–	–	–	1:3,5 (na głębokości 500 – 600 m)	–	–	b.d.
Maksymalna temperatura soli	80°C	–	–	–	–	46°C	–	50°C
Objętość obiektu	300 000–750 000 m^3 (wysady solne) 100 000 m^3 (sole pokładowe)	–	–	90% objętości geometrycznej	–	–	–	170–400 tyś m^3
Trwałość komory	30–50 lat	–	–	–	–	–	–	b.d.

*na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB)

b.d. – brak danych

Tabela 13

Wybrane geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych magazynów substancji w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Czynniki lokalizacji	Kryteria oceny lokalizacji
	Matos i in., 2019
Rodzaj struktury	intruzywne skały magmowe, masywne skały osadowe chemiczne, masywne skały metamorficzne
Rodzaj skał	skały homogeniczne, izotropowe; bez śladów deformacji tektonicznych, skały słabozuskokowane, słabozeszczelinowane, niesfałdowane, niespękane; brak nieciągłości
Głębokość	70–200 m lub głębiej
Porowatość	niska
Przepuszczalność	niska
Współczynnik filtracji	$<10^{-8}$ m/s (dla wody)
Warunki termiczne	4–80°C
Trwałość komory	≥30 lat

wynika z możliwości technicznych wykonania komór skalnych oraz zagospodarowania wyrobisk kopalń podziemnych.

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Za podstawowe geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych lub w wyrobiskach kopalń podziemnych można uznać (Ślizowski K. i in., 2004):

- odpowiednią wielkość wybranej formacji skalnej, wystarczającą do pomieszczenia składowiska i calizn ochronnych oraz zapewniającą odpowiednią odległość od stref geologicznych nieciągłości;
- szczelność składowiska uniemożliwiającą ewentualne zatopienie wodami powierzchniowymi poprzez wyrobiska udostępniające oraz dla składowisk głębokich w wyniku zeszczelinowania górotworu i przedostania się wód podziemnych z poziomów wodonośnych;
- dużą wytrzymałość na działanie sił zewnętrznych oraz naprężeń wywołanych wykonaniem wyrobisk składowiska, w szczególności w składowiskach głębokich;
- lokalizacja na obszarach nieobjętych działalnością sejsmiczną;
- stabilność masywu skalnego w wymaganym okresie czasu.

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów, prezentowane w literaturze przez różnych autorów, zestawiono poniżej w tabelach 15–18.

Należy podkreślić, że podobnie jak w przypadku podziemnych magazynów substancji, grupa kryteriów lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych będzie bardzo zróżnicowana, co wynika z odmiennych warunków geologicznych struktur, w jakich mogą być lokalizowane.

Kryteria lokalizacji podziemnych kompleksów składowania CO_2 w formacjach porowatych/szczelinowatych

Lokalizacja przeznaczona na podziemny kompleks składowania CO_2 powinna spełniać wiele kryteriów, w tym kryteria geologiczne decydujące o jej przydatności do składowania. Przy wyborze miejsca składowania dwutlenku węgla powinno się uwzględniać: odległość od głównych źródeł emisji, rodzaj i pojemność struktury przeznaczonej do składowania, budowę geologiczną, głębokość zalegania warstw zbiornikowych, mineralizację wód podziemnych, uwarunkowania geotermalne, hydrodynamiczne oraz aspekty ekonomiczne i prawne[25].

Przykładem oceny kryteriów, uwzględnianych przy wyborze lokalizacji składowiska CO_2 i określaniu jego pojemności, może być metodyka podana przez Bachu (2003)

[25] IPCC, 2005; Tarkowski, 2005; Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2005, 2007; Dubiński, Solik-Heliasz, 2007; Chadwick i in., 2008; Tarkowski i in., 2009a, b; Wójcicki, 2009; Dubiński i in., 2010; Dubiński, Koteras, 2014; Wójcicki i in., 2013; Sylwester i in., 2013; Wójcicki, Nagy, 2014; Pieńkowski, 2021.

Tabela 14

Wybrane kryteria lokalizacji podziemnych magazynów gazu w wyrobiskach kopalń węgla kamiennego

Kryteria oceny lokalizacji		
Kidybiński i in., 2004	Kidybiński, Siemek, 2006	Siemek, Nagy, 2007
Obecność w nadkładzie jednolitej grubej warstwy gazoszczelnej pokrywającej cały zbiornik. Brak połączeń gazowych z sąsiednimi czynnymi kopalniami (jeśli istnieją). Objętość pustek i zdolności sorpcyjne (oraz szybkość desorpcji) pozostawionych w kopalni resztek węgla. Możliwości i spodziewane koszty uszczelniającej likwidacji wszystkich szybów kopalni oraz niecałkowicie zlikwidowanych otworów wiertniczych z powierzchni. Obecność w zbiorniku lub jego bliskim sąsiedztwie wodonośnych skał porowatych – mogących poprawić pojemność i zdolności oddawcze zbiornika. Pozytywne wyniki makropróby nadciśnienia powietrza całego zbiornika (po likwidacji szybów) lub jego otamowanych istotnych części (przy niezlikwidowanych szybach) – norma PN-EN 1918-4. Ekonomiczna kalkulacja opłacalności całości budowy PMG, z uwzględnieniem spodziewanego czasu jego eksploatacji oraz czasu zwrotu poniesionych na budowę nakładów finansowych	**Kryteria oceny lokalizacji ze względu na całą kopalnie:** Niewielki stopień naturalnego spękania górotworu karbońskiego, korzystne zaleganie warstw skalnych oraz dopuszczalny stopień uszkodzenia górotworu przez eksploatację górniczą. Gruby, ciągły i nieprzepuszczalny nadkład warstw karbońskich bądź izolujący poziom wodonośny. Brak połączeń z czynnymi kopalniami w sąsiedztwie. Korzystne warunki hydrogeologiczne w otoczeniu zbiornika i niewielki dopływ wody do kopalni. Spodziewana duża pojemność zbiornika (łącznie gazu wolnego w pustkach pogómiczych i gazu zaabsorbowanego w resztkach węgla pozostawionych w kopalni). Ciśnienie magazynowanego gazu nie powinno przekraczać wartości tzw. ciśnienia przebicia, które jest rzędu 65–70% ciśnienia hydrostatycznego w przypadku magazynowania gazu w wyrobiskach górniczych w otoczeniu których znajduje się górotwór naturalnie nasycony wodą. **Kryteria oceny lokalizacji ze względu na szczelność:** Górotwór prawie niespękany lub mało spękany; uskoki (szczeliny) występujące w górotworze: nachylone maksymalnie pod kątem 10°, równoległe lub skośne do uwarstwienia, pojedyncze, zaciśnięte lub rozwarte – całkowicie wypełnione substancją mineralną np. iłem, kalcytem, krzemionką, wielkości zrzutu uskoków nieprzekraczające miąższości warstwy; rozkład spękań: powierzchniowa gęstość spękań w granicach 2–8 m/m^2, odstęp między spękaniami 0,2–0,5 m, objętość bloków powstałych w wyniku spękania górotworu w granicach 10–130 dm^3. Warstwy skalne otaczające wyrobisko powinny: zalegać poziomo lub prawie poziomo, być zbudowane ze skał nieprzepuszczalnych lub pakietów skał przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych o min. grubości 50 m; być izolowane od powierzchni ciągłą pokrywą utworów ilastych lub zawodnionych utworów piaszczystych o min. miąższości 30 m	Nieprzepuszczalny nadkład. Optymalnie – średnie zawodnienia kopalni. Możliwie duża objętość udostępnionego a nie wyeksploatowanego węgla. Niewielka liczba wyrobisk udostępniających złoże z powierzchni – wymagających szczelnego podsadzenia. Usytuowanie obiektu w pobliżu zmasowanego kręgu odbiorców gazu o dużych sezonowych i dobowych wahaniach zapotrzebowania

Tabela 15

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych

Kryteria oceny lokalizacji				
Marcak, Pilecki, 1998	Ślizowski K. i in., 2004	Kłeczek, Zeljaś, 2005	Pozzi, Mzyk, 2007	Poborska-Młynarska, Korzeniowski, 2015
Odpowiednia techniczna izolacja odpadów, która w pewnych przypadkach jest trzystopniowa: wewnątrz pojemnika, zabezpieczenie pojemnika i uszczelnienie wyrobiska. Odpowiedni dobór warunków górniczo-geologicznych, który stanowi dodatkową barierę izolacyjną	Formacja geologiczna musi być wystarczająco rozległa w celu pomieszczenia składowiska i filarów ochronnych. Składowisko powinno być zlokalizowane w środowisku geologicznym o odpowiednim wykształceniu litologicznym w celu zapewnienia neutralizacji efektów geochemicznych i geomechanicznych. Warunki hydrogeologiczne powinny wykluczać możliwość kontaktu z krążącymi wodami podziemnymi, w tym celu konieczne jest określenie porowatości, przewodności hydraulicznej, gradientu hydraulicznego oraz mechanizmu ruchu wód podziemnych. Obszar lokalizacji składowiska powinien charakteryzować się brakiem aktywności tektonicznej i sejsmicznej, zapewniając stabilność składowiska. Konieczność uwzględniania czynników naturalnych lub spowodowanych działalnością ludzką, które mogą mieć wpływ na naruszenie stabilności składowiska. Występowanie na wytypowanym obszarze zasobów kopalin użytecznych. Warunki geomorfologiczne i inne czynniki, które mogą mieć niekorzystny wpływ na eksploatację składowiska	Lokalizacja w formacji geologicznej, która pomieści objętościowo całe składowisko, przy uwzględnieniu calizn ochronnych, zapewniających wystarczającą odległość od stref nieciągłości geologicznych. Fizyczne i chemiczne właściwości skał i minerałów, wykluczające możliwość mineralnych reakcji ze składowanymi odpadami. Szczelność zapewniająca absolutną pewność braku kontaktu odpadów z wodą. Wytrzymałość skał otaczających składowisko zapewniająca ich długotrwałą stateczność w aspekcie zdolności przejęcia koncentracji naprężeń, jakie są wynikiem przejścia z pierwotnego stanu naprężenia do wtórnego stanu równowagi górotworu. Niska aktywność sejsmiczna. Odpowiednia odległość od zasięgu silnej aktywności tektonicznej, aby nie była zagrożona cała struktura składowiska. Jednorodna formacja skalna przeznaczona na składowisko, o prostej budowie geologicznej, korzystnych własnościach skał, aby podczas budowy, funkcjonowania i likwidacji składowiska było zapewnione bezpieczeństwo i długotrwała stateczność otaczających barier geologicznych. Bariera geologiczna musi charakteryzować się brakiem gwałtownych zmian ewolucyjnych w wyniku procesów geodynamicznych i antropogenicznych. Stosunki hydrogeologiczne wyjątkowo korzystne, zapewniające odizolowanie formacji skalnej przeznaczonej na składowisko od wód podziemnych systemem barier geologicznych i tektonicznych, tak aby nie dopuścić do kontaktu wód podziemnych z odpadami	Wyrobiska górnicze kopalń węgla kamiennego zlokalizowane na dużych głębokościach (ponad 400–500 m). Wyrobiska górnicze funkcjonujące w otwartych i półotwartych układach hydraulicznych	Budowa geologiczna. Stosunki wodne w otoczeniu wysadu solnego. Struktura kopalni. Bezpieczeństwo wodne (wydzielone zgodnie z przepisami strefy, w których nie prowadzi się eksploatacji i nie wykonuje wyrobisk górniczych oraz pozostawia filary bezpieczeństwa, graniczne i ochronne, zabezpieczające kopalnie przed dopływem wód podziemnych spoza złoża). System eksploatacji – sposób wybierania, kształt komór, odległość między filarami międzykomorowymi, usytuowanie komór na kolejnych międzypoziomach rozdzielonych półką międzypoziomową. Wymiary komór i filarów międzykomorowych oraz grubość półek międzypoziomowych zależą od głębokości eksploatacji. Zagrożenia naturalne – wodne (klasyfikowane zgodnie z przepisami), które powodują wody pochodzące z nadległych i otaczających złoże poziomów wodonośnych (pozazłożowe) lub wody wewnątrzzłożowe.

Tabela 16

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych występujących płytko pod powierzchnią terenu (Ślizowski K. i in., 2004)

Czynniki lokalizacji		Kryteria oceny lokalizacji	
		formacja geologiczna nieprzepuszczalna	formacja geologiczna częściowo przepuszczalna
Warunki geologiczne. Preferowany typ gruntów lub rodzaj skał		warstwy glin zwałowych lub iłów zwietrzelinowych o dużej grubości i rozprzestrzenieniu; skały ilaste starszego podłoża (trzeciorzędowe*, kredowe, jurajskie) szczelne, płytko zalegające pod powierzchnią terenu	grube kompleksy utworów ilastych lub gliniastych przewarstwione wkładkami utworów pylastych lub piaszczystych, skały ilaste przewarstwione wkładkami skał pylastych lub piaskowcami
Geometria ośrodka lokalizacji składowiska: – jednopoziomowego – wielopoziomowego – powierzchnia		miąższość warstwy nieprzepuszczalnej: – do 10 m – do 20 m – 5000–15 000 m^2	miąższość warstwy półprzepuszczalnej: – do 10 m – do 20 m – 5000–15 000 m^2
Budowa geologiczna		jednorodna seria glin zwałowych; jednorodna seria utworów ilastych lub gliniastych; miąższy, jednorodny kompleks skał ilastych starszego podłoża z warstwą zwietrzelin w stropie	jednorodna seria gruntów gliniastych lub ilastych z wkładkami gruntów przepuszczalnych lub gruntów słaboprzepuszczalnych o jednakowych właściwościach
Warunki hydrogeologiczne Zawodnienie ośrodka lokalizacji składowiska		dopuszczalne w warstwie stropowej oraz podścielającej	dopuszczalne w warstwie stropowej oraz w warstwie podścielającej; wkładki pylaste lub piaszczyste charakteryzujące się małą przepuszczalnością
Warunki górnicze	najmniejsza głębokość stropu warstwy nieprzepuszczalnej	5 m	5 m
	minimalna grubość odtworzonej nieprzepuszczalnej pokrywy stropowej, nad składowiskiem	3 m	5 m
	grubość warstwy półki spągowej	zależna od warunków hydrogeologicznych pod składowiskiem	zależna od warunków hydrogeologicznych pod składowiskiem.
	grubość strefy przeznaczonej do składowania odpadów (w zależności od warunków geologicznych)	do 10 m	do 10 m

*patrz: przypis nr 5 – str. 16

Tabela 17

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych występujących we wnętrzu wzniesień (Ślizowski K. i in., 2004)

Czynniki lokalizacji		Kryteria oceny lokalizacji
Warunki geologiczne, preferowany typ skał		skały ilaste bez intensywnych zaburzeń tektonicznych, ułożone pod małym katem upadu (do 15°) odsłaniające się w zboczach wzniesienia, dopuszczalne są pojedyncze wkładki skał pylastych
Geometria ośrodka lokalizacji składowiska		miąższość skał warstwy nieprzepuszczalnej 20–50 m dla budowy komór składowiskowych; w nadkładzie i spągu tej warstwy skały wodoszczelne lub o małym zawodnieniu; minimalna wysokość wzniesienia 500 m; filary ochronne: – w osi komór składowiska o minimalnej grubości 50 m, – od zbocza wzniesienia o minimalnej grubości 100 m
Budowa geologiczna		nachylenia zbocza wzniesienia 15–30°; upad warstwy wodoszczelnej do 15°; niezaburzone, sedymentacyjne ułożenie warstw skalnych, bez przerw sedymentacyjnych i większych stref dyslokacyjnych
Warunki hydrogeologiczne		wyklucza się zawodnienie masywu skał ilastych, w którym proponuje się lokalizację składowiska; dopuszcza się obecność wód szczelinowych w stropie i spągu składowiska z zastrzeżeniem konieczności przeliczenia niezbędnej grubości warstwy zabezpieczającej przed przerwaniem ochronnych półek: stropowej i spągowej przez ciśnienie wód, w zależności od przyjmowanych wymiarów komór składowiska
Warunki górnicze	min. miąższość kompleksu wodoprzepuszczalnego	>20 m
	min. grubość warstwy w półce stropowej	zależnie od ciśnienia wód w warstwie stropowej
	min. grubość warstwy w półce spągowej	zależnie od ciśnienia wód w warstwie spągowej
	min. grubość nadkładu nad warstwą wodoszczelną	50 m
	min. grubość filara ochronnego od zboczy wzniesienia	100 m

Tabela 18

Geologiczne kryteria lokalizacji podziemnych składowisk odpadów w komorach skalnych występujących głęboko pod powierzchnią terenu lub w wyrobiskach kopalń podziemnych (Ślizowski K. i in., 2004)

Czynniki lokalizacji			Kryteria oceny lokalizacji			
			Rodzaj skał budujących formację skalną słaboprzepuszczalną			
			skały magmowe i metamorficzne	skały ilaste	wysadowe złoża soli kamiennej	pokładowe złoża soli kamiennej
Warunki geologiczne	preferowany typ skał		skały zwięzłe o jednorodnej strukturze: granity, gnejsy, bazalty, porfiry, bez większych wkładek i foliacji	utwory zwięzłe: iły, łupki ilaste i margliste pozbawione wkładek piaszczystych	struktury solne zawierające warstwy: – soli kamiennej o małym udziale wkładek ilastych, anhydrytowych i soli potasowo-magnezowych; – jednorodne kompleksy zubrów	grube jednorodne pokłady (poduszki) soli kamiennej w położeniu autochtonicznym o małym udziale wkładek ilastych, anhydrytowych i soli potasowo-magnezowych
	geometria ośrodka, lokalizacja składowiska		jednorodne masywy skalne o minimalnej miąższości 200 m	poziomy lub łagodnie nachylony jednorodny układ warstw o miąższości >200 m	jednorodne kompleksy skał solno-ilastych o dużym rozprzestrzenieniu, miąższość pokładów soli i zubrów >100 m	poziomy lub łagodnie nachylony pokład soli kamiennej o miąższości >150 m
	budowa geologiczna i tektonika		prosta bez większych nieciągłości tektonicznych w postaci otwartych uskoków, stref skruszenia w obrębie składowiska i calizn ochronnych	niezaburzona stała miąższość kompleksu ilastego w obrębie składowiska i stref ochronnych; brak większych nieciągłości tektonicznych	struktury nieobjęte wpływami wzmożonego diapiryzmu; lokalizacja składowiska w jednorodnym kompleksie skał solnych z wykluczeniem stref przejściowych, a zwłaszcza miąższych warstw anhydrytu	ciągłość pokładu solnego i otuliny ilastej w stropie i spągu umożliwiająca przyjęcie bocznej strefy ochronnej >200 m
	warunki geodynamiczne		obszar o dopuszczalnej słabej działalności sejsmicznej	obszar nieobjęty działalnością sejsmiczną	obszar o dopuszczalnej słabej działalności sejsmicznej; strefy lokalizacji nieobjęte wewnętrznymi ścięciami i granicami nasunięć różnych kompleksów stratygraficznych	obszar o dopuszczalnej słabej działalności sejsmicznej
Warunki hydrogeologiczne	zawodnienie górotworu, w którym jest planowane składowisko		środowisko skalne szczelne, w przypadku drobnych zjawisk wodnych dopuszczalne są zabiegi tamponażu uszczelniającego trwale górotwór	naturalna izolacja wyrobisk składowiska i stref ochronnych od dopływu wód podziemnych; dopuszczalne są prace tamponażowania śladowych zjawisk wodnych	wymagana szczelność górotworu (sól, zubry), dopuszczalne są kroplowe zjawiska wodne w postaci solanek reliktowych	wymagana szczelność pokładu i skał otaczających, dopuszczalne są niewielkie zjawiska wodne w postaci solanek reliktowych
	zawodnienie utworów występujących w otoczeniu górotworu składowiska		szczelne stropowe utwory skalne, utwory około masywu krystalicznego niemające kontaktu hydraulicznego z warstwami wodonośnymi nadkładu lub wgłębnymi poziomami wodonośnymi	środowisko skalne w rejonie składowiska i jego stref ochronnych pozbawione dopływu wód podziemnych	struktury skalne, w nadkładzie których występują słabo zawodnione utwory czwartorzędowe, czapa iłowa; utwory okołozłożowe niemające kontaktu hydraulicznego z warstwami wodonośnymi nadkładu	brak występowania zasobnych horyzontów wodnych o ciśnieniowym zwierciadle wód
Warunki górnicze	głębokość strefy skał nieprzepuszczalnych	min.	100 m	150 m	100 m	300 m
		max	800 m	400 m	500 m	700 m
	grubość warstwy nieprzepuszczalnej		>100 m	ok. 30 m	>100 m	ok. 30 m
	min. grubość warstwy tworzącej półkę stropową nad składowiskiem		200 m	100 m	200 m	90 m

i Vangkilde-Pedersen (2008)[26]. W szacowaniu pojemności struktury geologicznej przeznaczonej do składowania dwutlenku węgla, podobnie jak ma to miejsce w przypadku szacowania zasobów kopalin, stosuje się różne kategorie pojemności[27] składowania CO_2, określane w kilku etapach. Zatem, praktyczna pojemność składowania jest częścią efektywnej pojemności, uzyskaną po uwzględnieniu ekonomicznych i prawnych ograniczeń geologicznego składowania oraz aspektów społecznych i środowiskowych w procesie lokalizacji miejsc składowania. Przy tym oszacowaniu dopasowuje się najlepsze i najbliższe miejsce składowania do dużych źródeł emisji, co daje możliwość oceny pojemności tego składowania w skali regionalnej (lokalnej). Pojemność dopasowaną otrzymuje się przez szczegółowe porównanie dużych źródeł emisji z miejscami geologicznego składowania przy jednoczesnym uwzględnieniu pojemności, chłonności i prędkości zatłaczania CO_2 (Szczygieł, 2009 za Dubiński, 2010).

Na podstawie bogatej literatury w tabeli 19 zestawiono kluczowe kryteria lokalizacji podziemnych kompleksów składowania CO_2.

Kryteria oceny lokalizacji podziemnych magazynów wodoru

Z uwagi na prowadzone działania związane z transformacją energetyczną oraz z zapewnieniem bezpieczeństwa energetycznego, w najbliższych latach na terenie Polski będzie konieczne wskazanie miejsc budowy podziemnych magazynów wodoru. W kraju nie ma doświadczeń dotyczących wyboru lokalizacji struktur z przeznaczeniem na podziemne magazynowanie tego pierwiastka. W literaturze głównie opierano się na analogiach do magazynowania gazu ziemnego i składowania CO_2 (Tarkowski, 2019). Wynika to z dużego praktycznego doświadczenia zdobytego przy magazynowaniu tych substancji w strukturach geologicznych. Przeprowadzona przez Tarkowskiego (2019), na podstawie wielu pozycji literaturowych[28], analiza porównawcza geologicznych, technicznych, środowiskowych oraz ekonomicznych kryteriów lokalizacji podziemnych magazynów wodoru (tab. 20), może stanowić podstawę przeprowadzenia wstępnej oceny możliwości lokalizacji podziemnych magazynów tego gazu w Polsce.

[26] *za*: Chadwick i in., 2006; Special Report..., 2007; Wójcicki, 2009; Dubiński i in., 2010; Wójcicki i in., 2013, Dubiński, Koteras, 2014.

[27] Kategorie pojemności składowania CO_2 (Wójcicki, 2009; Wójcicki i in., 2013):
- **teoretyczna pojemność składowania** stanowi całkowitą ilość CO_2 jaką może pomieścić dana jednostka geologiczna w całej objętości porowej w odpowiednim przedziale głębokości;
- **efektywna pojemność składowania** to część pojemności teoretycznej, ograniczona przez geologiczno-inżynierskie aspekty szacowania pojemności składowania, podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa i konflikty interesów, wyznaczana na ogół dla poszczególnych struktur lub obszarów w obrębie jednostki geologicznej (uwzględniając ich głębokość, ciśnienie, porowatość, udział nieredukowalnej wody złożowej w porach, a w szczególności współczynnik efektywności składowania);
- **praktyczna pojemność składowania** to pojemność po uwzględnieniu kryteriów technicznych, ekonomicznych, prawnych oraz przeprowadzeniu oceny źródeł emisji w stosunku do miejsc składowania; pojemność (dynamiczna) uzyskana w wyniku szczegółowych analiz II Segmentu, obejmujących konkretne scenariusze zatłaczania, odpowiada pojemności praktycznej, chociaż jeszcze bez analiz ekonomicznych.

[28] Foh i in., 1979; McGown, Bockris, 1980; Kłeczek i in., 2005; Tarkowski, 2005; Evans, 2007; Sørensen, 2007; Tarkowski, 2008; Kunstman i in., 2009; Stone i in., 2009; Tarkowski i in., 2009a, b; Lord i in., 2011, 2014; Ślizowski J., Urbańczyk, 2011; Gąska i in., 2012; Šliaupa i in., 2013; Assessment of..., 2014; Bai i in., 2014; Iordache i in., 2014; Reitenbach i in., 2015; Bünger i in., 2016; Panfilov, 2016; Zohrabian i in., 2016; Le Duigou i in., 2017; Lepszy i in., 2017; Michalski, 2017; Michalski i in., 2017.

Tabela 19

Kluczowe kryteria lokalizacji podziemnych kompleksów składowania CO_2

Czynniki lokalizacji		Kryteria oceny lokalizacji															
		Dubiński i in., 2014 na podstawie: Dubiński i in., 2007; IPCC, 2005		Chadwick i in., 2006, 2008				Tarkowski i in., 2009a, b na podstawie Chadwick i in., 2006			Wójcicki i in., 2013 na podstawie Chadwick i in., 2006				na podstawie: Chadwick i in., 2006; 2008; Wójcicki i in., 2013;		Pieńkowski, 2021
		wskaźniki pozytywne	wskaźniki negatywne	wskaźniki pozytywne		wskaźniki ostrzegawcze		wskaźniki pozytywne	wskaźniki ostrzegawcze	wskaźniki negatywne	wg Chećko i in. oraz Jankowski i in.	wg Warzecha i Bromek	wg Wójcicki i Jarosiński		wskaźniki optymalne	wskaźniki graniczne	wskaźniki optymalne
				2008	2006	2008	2006						wskaźniki pozytywne	wskaźniki negatywne			
Pojemność składowiska		całkowita pojemność zbiornika powinna być większa niż całkowita przewidywana produkcja CO_2 przez emitenta przewidziana do składowania	całkowita pojemność zbiornika jest taka sama lub niższa niż całkowita przewidywana produkcja CO_2 przez emitenta przewidziana do składowania	statyczna: szacowana efektywna pojemność składowiska znacznie większa niż całkowita ilość CO_2 przewidziana do zatłaczania; dynamiczna: przewidywane ciśnienie zatłaczania znacznie poniżej poziomu mogącego spowodować geomechaniczne zniszczenie warstw zbiornikowych lub warstw uszczelnienia	szacowana całkowita pojemność zbiornika znacznie większa niż całkowita ilość CO_2 wyprodukowana prze źródło emisji	statyczna: szacowana efektywna pojemność składowiska podobna do całkowitej ilość CO_2 przewidzianej do zatłaczania; dynamiczna: przewidywane ciśnienie zatłaczania zbliżone do granicy stabilności geomechanicznej	szacowana całkowita pojemność zbiornika jest podobna lub mniejsza niż całkowita ilość CO_2 wyprodukowana prze źródło emisji	>60 Mt	30–60 Mt	<30 Mt	b.d.	>40 Mt	b.d.	b.d.	pojemność składowania struktury wyraźnie większa niż całkowita emisja zakładu przemysłowego	pojemność składowania struktury zbliżona do całkowitej emisji zakładu przemysłowego	b.d.
Właściwości zbiornika (kolektora)	głębokość	>1000 m, <2500 m	<800 m, >2500 m	>1000 m, <2500 m		<800 m, >2500 m		>800 m, <2500 m	2500–3500 m	<800 m, >3500 m	800–2500 m	>800 m, <2500 m	>=800 m, <=2000–2500 m	>2500–3000 m	>800 (faza nadkrytyczna) <3000 (zależnie od właściwości zbiornikowych)	ok. 800 (faza ciekła)–3000 (zależnie od właściwości zbiornikowych)	800–2000 m
	miąższość	>50 m	<20 m	>50 m		<20 m		>50 m	20-50 m	<20 m	> 30 m	>50 m	>=50m	<20m	>30 m	20 m	min. 20–30 m
	porowatość	>20%	<10%	>20%		<10%		>20%	10–20%	<10%	>20% (>10%)*	>9%	>=10–20%	<10%	b.d.	10% (może być mniej jeśli ośrodek porowato-szczelinowy)	min. 10%
	przepuszczalność	>300 mD	10–100 mD	>500 mD	>300 mD	<200 mD	<10–100 mD	>300 mD	300–100 mD	100–10 mD	>=100mD	<10–100 mD	>300 mD	10–100 mD	>300 mD	10–100 mD	min. 100 mD
	mineralizacja	>100g/dm^3	<30 g/dm^3	>100 g/dm^3		<30 g/dm^3		>100 g/dm^3	100–30 g/dm^3	<30 g/dm^3	> 30g/dm^3	> 30g/dm^3	>=30–100 g/l	<10 g/l	b.d.	30 g/l (brak kontaktu z użytkowymi wodami słodkimi; jeśli wiemy z innych przesłanek, że taki kontakt nie ma miejsca, wartość minimalna może być niższa)	b.d.
	stratygrafia	b.d.	b.d.	jednolita	b.d.	zmienna poziomo	zmienna poziomo	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Właściwości warstw izolujących	ciągłość pozioma (uskoki)	ciągła, brak uskoków	nieciągła, strefy uskokowe	mało lub brak uskoków	brak uskoków	średnio lub dużo uskoków	występują uskoki	brak uskoków	uskoki wygasające w formacji do składowania	uskoki przechodzące w skały nadkładu	o budowie ciągłej, niezaburzonej	brak uskoków	integralne w pionie i poziomie	uskoki w obrębie warstw	nadkład (uszczelnienie) pozbawiony uskoków, nieprzepuszczalny, integralny, dodatkowe 1–2 uszczelnienia powyżej	b.d.	integralność, podatność na spękania, stopień zdiagenezowania
	miąższość nadkładu	>100 m	<20 m	>100 m		<20 m		>100 m	20–100 m	<20 m	>50 m	>100 m	>100 m	20–50 m	>100 m	50 m	≥50 m
	pierwotne ciśnienie piezometryczne	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu dużo wyższe niż efekt wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu zbliżone do efektu wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	dużo wyższe niż maksymalny przewidywany wzrost ciśnienia zatłaczania	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu dużo wyższe niż efekt wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	podobne do maksymalnego przewidywanego wzrostu ciśnienia zatłaczania	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu zbliżone do efektu wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	struktury solankowe – b.d.; złoża węglowodorów – ciśnienie po zakończeniu zatłaczania nie większe od pierwotnego	struktury solankowe – ciśnienie po zakończeniu zatłaczania większe o ok. 15% od pierwotnego; złoża węglowodorów – ciśnienie po zakończeniu zatłaczania większe o 10% od pierwotnego	b.d.

b.d. – brak danych

Tabela 20

Wybrane kryteria oceny lokalizacji podziemnych magazynów wodoru (Tarkowski, 2019)

Czynnik lokalizacji	Kryteria oceny lokalizacji		
	Podziemne magazyny wodoru		
	w formacjach wodonośnych	w formacjach złóż węglowodorów	w komorach solnych
1	**2**	**3**	**4**
Występowanie	we wszystkich basenach sedymentacyjnych	pułapki z nagromadzeniami węglowodorów	w basenach sedymentacyjnych zawierających pokłady ewaporatowe
Głębokość warstwy zbiornikowej	różne głębokości, optymalnie do 2000 m	różne głębokości, optymalnie do 2000 m	różne głębokości, optymalnie do 1500 m
Litologia skał zbiornikowych i uszczelniających	skały zbiornikowe o wysokiej porowatości i przepuszczalności, obecność izolacji od góry, brak szczelin	skały zbiornikowe o wysokiej porowatości i przepuszczalności, obecność izolacji od góry, brak szczelin	złoża soli o dużej miąższości, najbardziej przydatne wystąpienia pokładowe
Rozpoznanie geologiczne	niskie; ostatnie rozpoznanie związane z oceną potencjału dla CCS*	dobrze rozpoznane	
Pojemność magazynowania	bardzo duża i duża	bardzo duża i duża; zbliżona do ilości wyeksploatowanego gazu	duża; odpowiadająca pojemności kawerny lub grupy kawern
Szczelność geologiczna	szczelność warstwy wodonośnej początkowo nieznana, niskie ryzyko wycieku gazu	obecność złoża gazu potwierdza szczelność	szczelność zapewniają korzystne właściwości soli
Wymagane badania	możliwe ścieżki wycieku – badania geofizyczne, wiercenia, badania otworowe, badania laboratoryjne próbek skał; reaktywność chemiczna, mineralogiczna i biologiczna pomiędzy wodorem, a formacją skalną i jej nadkładem uszczelniającym; szczelność nadkładu pod kątem przenikania wodoru, monitoring szczelności i kontrola ciśnienia w magazynie; szczegółowa charakterystyka lokalizacji oraz utworzenie cyfrowego modelu	monitoring szczelności i kontrola ciśnienia w magazynie; reaktywność chemiczna, mineralogiczna i biologiczna między wodorem, a formacją skalną i jej nadkładem uszczelniającym; szczelność nadkładu pod kątem przenikania wodoru; szczegółowa charakterystyka lokalizacji oraz utworzenie cyfrowego modelu	badania geofizyczne podczas ługowania; badania zmian kawerny w trakcie eksploatacji; szczegółowa charakterystyka lokalizacji oraz opracowanie cyfrowego modelu
Najnowsze doświadczenia na świecie	brak doświadczenia w magazynowaniu czystego wodoru; z powodzeniem działają liczne podziemne magazyny gazu ziemnego		pozytywne doświadczenia w magazynowaniu wodoru i innych gazów
Dostępność struktur geologicznych i istniejącej infrastruktury	dostępność głębokiego poziomu wodonośnego o odpowiednio rozpoznanych korzystnych warunkach geologicznych, zwykle blisko użytkowników końcowych; brak obecnej infrastruktury	dostępność złóż (naturalne pułapki geologiczne) o rozpoznanych korzystnych warunkach geologiczno-górniczych; istniejąca infrastruktura może zostać przystosowana do magazynowania gazu	dostępność złóż soli o wystarczająco rozpoznanych korzystnych warunkach geologiczno-górniczych; brak obecnej infrastruktury
Liczba cykli zatłaczanie i odbiór	jeden, maksymalnie dwa cykle zatłaczania i odbioru rocznie		możliwość wielokrotnych (do 10) cykli zatłaczania i odbioru gazu w ciągu roku
Liczba otworów	kilka odwiertów do zatłaczania i odbierania gazu; wymagane dodatkowe odwierty obserwacyjne	kilka odwiertów do zatłaczania i odbierania gazu; wymagane dodatkowe odwierty obserwacyjne	jeden otwór na kawernę
Szczelność techniczna	odwierty (konieczność likwidacji lub uszczelnienia już istniejących otworów, nowe odwierty wytrzymałe na działanie wodoru)		
Cel magazynowania	sezonowe magazynowanie		magazynowanie częściej niż sezonowo
Zanieczyszczenia w odbieranym gazie	niepożądane reakcje z utratą wodoru wytwarzające gazy takie jak H^2S i CH^4	niepożądane reakcje z utratą wodoru wytwarzające gazy takie jak H^2S i CH^4, mieszanie pozostałości węglowodorów z wodorem	zanieczyszczenia spowodowane niepożądanymi reakcjami między wodorem a przewarstwieniami innymi niż sól kamienna

Tabela 20 cd.

1	2	3	4
Ograniczenia	adaptacja istniejących odwiertów może być niewykonalna, musi być dostępna odpowiednia technologia i sprzęt do budowy i eksploatacji systemu magazynowania wodoru	adaptacja istniejących odwiertów może być niewykonalna, musi być dostępna odpowiednia technologia i sprzęt do budowy i eksploatacji systemu magazynowania wodoru; niekorzystnym zjawiskiem może być reaktywność wodoru z ciekłymi węglowodorami ograniczająca przydatność wyeksploatowanych złóż ropy naftowej	konwergencja powodująca zaciskanie kawerny; konieczna dostępna odpowiednia technologia oraz sprzęt do budowy i eksploatacji systemu magazynowania wodoru; niezbędna dostępna woda do ługowania kawern
Koszt budowy i eksploatacji	koszty wyższe niż w przypadku magazynowania w kawernach solnych lub warstwach wyeksploatowanych złóż węglowodorów	koszty niższe dla wyeksploatowanych złóż gazu niż ropy	koszty wyższe niż w przypadku wyeksploatowanych złóż węglowodorów

* wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla; sekwestracja dwutlenku węgla (ang. *carbon capture and storage*)

5. ZAGROŻENIA ZWIĄZANE Z PODZIEMNYM BEZZBIORNIKOWYM MAGAZYNOWANIEM SUBSTANCJI I PODZIEMNYM SKŁADOWANIEM ODPADÓW

Szczegółowe rozpoznanie struktury geologicznej przeznaczonej na obiekt podziemny służy w szczególności zminimalizowaniu różnych zagrożeń (nie tylko geologicznych), jakie mogą się pojawić na każdym etapie realizacji inwestycji. Przedsięwzięcie polegające na podziemnym bezzbiornikowym magazynowaniu substancji lub podziemnym składowaniu odpadów jest zawsze obarczone ryzykiem, w szczególności, gdy rozpoznanie właściwości górotworu jest niedostateczne. Istnieje także wiele czynników o charakterze technicznym wpływających na funkcjonowanie obiektu. W niektórych rodzajach obiektów oddziaływanie czynników technicznych na bezpieczeństwo obiektu może być większe niż czynników geologicznych. Wpływ czynników geologicznych jest większy w przypadku magazynów i składowisk zlokalizowanych w ośrodkach porowatych niż w obiektach typu kawernowego.

Doświadczenia w realizacji obiektów podziemnych pozwalają na zdefiniowanie listy najczęściej występujących zagrożeń w zależności od rodzaju działalności oraz struktury geologicznej w jakiej prowadzona jest działalność polegająca na magazynowaniu substancji lub składowaniu odpadów. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem technologicznym zabezpieczeń technicznych i procedur bezpieczeństwa, a także dzięki istniejącym kryteriom wyboru struktury do składowania lub magazynowania, możliwość wystąpienia zagrożeń jest coraz mniejsza. Niemniej jednak konieczność analizowania zagrożeń wynika z przepisów ustawy pgg. Znaczącą rolę odgrywa tu wymóg sporządzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej na podstawie rozporządzenia wykonawczego (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016). W dokumentacji geologiczno-inżynierskiej należy dokonać szczegółowej charakterystyki prognostycznej zagrożeń natury geologicznej, jakie mogą wystąpić podczas wykonywania, eksploatacji i likwidacji obiektu. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska (2016) dokumentacja geologiczno-inżynierska w tym zakresie powinna zawierać:

- ocenę możliwości wykonania projektowanej inwestycji z charakterystyką zagrożeń na etapie jej budowy, eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii;
- ocenę zagrożeń dla środowiska w wyniku podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów na etapie budowy projektowanej inwestycji, jej eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii;
- wpływ składu chemicznego odpadów na skałę zbiornikową.

W przypadku składowania dwutlenku węgla należy dodatkowo:

- opisać wszelkie obiekty, które mogą stanowić naturalne i antropogeniczne drogi migracji i wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania (np. odwierty iniekcyjne, wyrobiska górnicze itp.);
- ocenić możliwości wystąpienia wstrząsów sejsmicznych naturalnych i wzbudzonych działalnością człowieka w górotworze i ich ewentualny wpływ na właściwości izolacyjne oraz stateczność górotworu;
- dokonać oceny wpływu dwutlenku węgla na właściwości formacji geologicznej oraz na jakość wód w przypadku ewentualnego rozszczelnienia obiektu podziemnego;
- sformułować zalecenia dotyczące wprowadzenia rozwiązań minimalizujących wpływ składowiska na środowisko wraz z propozycjami zabezpieczeń, a także zalecenia dla dalszych badań oraz dla monitoringu obiektu dla fazy przedeksploatacyjnej, eksploatacyjnej, poeksploatacyjnej oraz po jego likwidacji.

W dokumentacjach geologiczno-inżynierskich możliwość wystąpienia zagrożenia i jego wpływu analizuje się w kilku aspektach:

- zagrożeń dla wód podziemnych i powierzchniowych oraz gleb;
- zagrożeń dla ludzi i zwierząt (ochrona przed hałasem i wibracjami);
- zagrożeń dla obiektów na powierzchni w wyniku nadmiernych osiadań gruntu;
- oddziaływań obiektu na górotwór (np. rozszczelnienie obiektu, zmiany naprężeń itp.);
- oddziaływań górotworu na obiekt (np. konwergencja, dopływ wody itp.).

Ponadto z punktu widzenia wyłącznie bezpieczeństwa, obiektu przeznaczonego na podziemne składowisko odpadów niebezpiecznych, a także innych niż niebezpieczne i obojętne (zgodnie z uchylonym Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 28 grudnia 2011...), nie lokalizuje się na obszarach występowania gwałtownych zjawisk lub zagrożonych ich oddziaływaniem, tj. na terenach:

- o zwiększonej aktywności sejsmicznej naturalnej lub wzbudzonej działalnością człowieka;

– o zwiększonej aktywności tektonicznej;
– strefy uskokowej;
– występowania ruchów masowych;
– występowania zjawisk krasowych lub sufozyjnych;
– występowania intensywnej erozji wgłębnej lub denudacji, których tempo wskazuje, że podziemne składowisko odpadów odsłoni się na powierzchni ziemi przed upływem 10 000 lat.

Największym zagrożeniem dla środowiska związanym z funkcjonowaniem magazynów gazu (zarówno w kawernach wyługowanych w wysadach solnych lub pokładach soli, jak i w innych strukturach geologicznych) jest przenikanie gazu ziemnego do otaczających struktur geologicznych. Zagrożenia niekontrolowaną migracją gazu lub jego awaryjnymi ucieczkami mogą wynikać z (Galiniak, 2003):
– nieszczelności otworów technologicznych (ewentualnie ich głowic) spowodowanych np. korozją rur okładzinowych lub złym stanem zacementowania;
– nieszczelności samej warstwy magazynowej (migracja przez szczeliny, przez nieciągłości w postaci uskoków czy przez warstwy nadkładu, które okazały się przepuszczalne, pomimo że pierwotne rozpoznanie geologiczne było inne);
– zbyt wysokiego ciśnienia magazynowego gazu.

Z doświadczeń światowych (Technologia..., 2009) wynika, że zagrożenia o najmniejszym prawdopodobieństwie wystąpienia są identyfikowane w wyeksploatowanych strukturach naftowych. Wynika to z faktu, że warunkiem utworzenia się złoża węglowodorów jest szczelność struktury, która jest zarazem głównym kryterium lokalizowania w niej obiektów podziemnych. Za mniej bezpieczne uważa się składowanie w nieeksploatowanych pokładach węgla. Jednak i tu doświadczenia z monitoringu powierzchniowego w Kaniowie (projekty: RECOPOL [2004–2005] oraz MOVECBM [2006–2008]) pokazują, że nie ma ku temu podstaw, chociaż ilość zatłoczonego CO_2 była w tym przypadku stosunkowo niewielka (ok. 700 ton). Podobnie jest w przypadku składowania w formacjach wodonośnych. Autorzy raportu dotyczącego składowania CO_2 (Technologia..., 2009) zaznaczają, że jest on składowany w formie mniej mobilnej, tj. wysokogęstościowej fazie nadkrytycznej, co ogranicza jego migrację. Ich zdaniem migracje ogranicza także fakt, że na potencjalne obiekty podziemne wybiera się struktury, w obrębie których występują warstwy uszczelniające o odpowiedniej miąższości i o dobrych parametrach izolacyjnych. Dodatkowo wytypowana struktura najczęściej ma charakter pułapki strukturalnej, co znacząco ogranicza możliwości rozprzestrzeniania się zatłoczonej substancji/odpadu poza obiekt. Największe zagrożenie stanowią niewłaściwie zlikwidowane otwory wiertnicze (potwierdzają to różne awarie stwierdzone na tego typu obiektach), które są potencjalnymi drogami migracji substancji na powierzchnię.

Lista możliwych zagrożeń zależy w dużej mierze od rodzaju struktury geologicznej, w jakiej planowana jest dana działalność, oraz od rodzaju magazynowanej substancji lub składowanego odpadu. Wszystkie łączy konieczność opracowania tzw. tła geochemicznego (stanu pierwotnego) ośrodka gruntowo-wodnego, tj. stanu sprzed rozpoczęciem realizacji obiektu. Jest to konieczne, żeby można było wiarygodnie ocenić wpływ obiektu na środowisko w czasie, na różnych etapach funkcjonowania inwestycji, w tym także po jej zamknięciu i likwidacji. W celu kontroli emisji gazu z magazynu prowadzi się badania tła gazowego w powietrzu glebowym, każdorazowo po cyklu zatłaczania i odbioru gazu.

W przypadku magazynowania gazów, większe różnicowanie zagrożeń będzie wynikało z rodzaju struktury i rodzaju obiektu niż z rodzaju gazu. Wyjątek stanowi wodór, który jest gazem specyficznym, nie tylko dlatego, że ma skłonności do wybuchu w przypadku zmieszania z innymi gazami, lecz również dlatego, że wykazuje wpływ na stal (tzw. kruchość wodorowa), więc może powodować zmniejszenie trwałości rur w stosunku do pozostałych gazów (Tarkowski, 2017).

Kwestie zagrożeń i wpływu obiektu na środowisko mają także znaczenie na etapie likwidacji podziemnego składowiska odpadów lub jego części. Prace likwidacyjne należy wykonać w sposób umożliwiający obserwację wpływu składowiska na środowisko oraz zabezpieczający przed: negatywnym oddziaływaniem odpadów na wody podziemne, infiltracją wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych przez budowę sztucznych barier geologicznych, zasypywanie i uszczelnianie wyrobisk górniczych pionowych, wyrobisk górniczych o nachyleniu powyżej 45° oraz odwiertów. Nie można też dopuścić do wydostania się produktów gazowych.

Zagrożenia wynikające z czynników geologicznych szczegółowo opisano wcześniej w rozdziale 4. Można je zminimalizować za pomocą dokładnego rozpoznania struktury przeznaczonej do magazynowania lub składowania. W dalszych rozdziałach zestawiono zagrożenia jakie opisywano w dokumentacjach geologiczno-inżynierskich dla wybranych rodzajów obiektów. Należy zaznaczyć, że są to zagrożenia rzadko występujące w rzeczywistości, ze względu na coraz większe zaawansowanie technologiczne oraz stały monitoring pozwalający w porę wychwycić wszelkie nieprawidłowości, jeżeli jest on prowadzony zgodnie z zasadami przedstawionymi w części I w rozdziale 8.3.

5.1. ZAGROŻENIA W FORMACJACH ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

W przypadku magazynowania lub składowania w formacjach sczerpanych złóż węglowodorów czynniki geologiczne (patrz: cz. I, rozdz. 4) są w dużej mierze uwzględnione i dobrze rozpoznane w trakcie działalności eksploatacyjnej kopalni. Zagrożenia w fazie adaptacji obiektu na magazyn/składowisko lub w fazie działania obiektu wynikają zatem głównie z czynników technologicznych, takich jak:
– nieszczelność odwiertów spowodowana korozją rur okładzinowych lub złym stanem zacementowania pierścieniowej przestrzeni;
– rozszczelnienie kolektora i jego nadkładu na etapie eksploatacji węglowodorów (migracja przez szczeliny, nieciągłości czy warstwy nadkładu);

– zbyt wysokie ciśnienie magazynowanego gazu (co może skutkować rozszczelnieniem kolektora i jego nadkładu);
– wycieki ze sprężarek i innych obiektów (dotyczy części powierzchniowej magazynu).

Istotną rolę odgrywają również kolejne cykle napełniania i opróżniania PMG, które mogą wywołać niewielkie wahania poziomu wód złożowych podścielających strefę gazonośną.

Możliwe jest także wystąpienie nadzwyczajnego zagrożenia środowiska obejmującego m.in.:
– erupcję gazu z uszkodzonej głowicy odwiertu lub uszkodzonego zarurowania odwiertu;
– erupcję gazu z gazociągu na trasie przesyłu;
– rozszczelnienie instalacji lub armatury na terenie PMG;
– rozszczelnienie zbiorników.

Dzięki stosowaniu nowoczesnych urządzeń wiertniczych, aparatury kontrolno-pomiarowej, wysokociśnieniowych głowic przeciwerupcyjnych, a także szeroko rozumianej profilaktyce, zagrożenie to jest kontrolowane w coraz większym stopniu. Ostatnie zdarzenie związane z działalnością obiektu podziemnego magazynowana lub składowania w Polsce miało miejsce w 2002 r. w Wierzchowicach, gdzie wystąpiła erupcja i samozapłon gazu ziemnego, doprowadzając do zniszczenia urządzenia zainstalowanego na tym otworze i pożaru. Przyczyną było naruszenie równowagi w górotworze, przemieszczenie się poduszki gazu w górę i jej zapłon (Stan..., 2008). Do tego zdarzenia doszło w trakcie wykonywania otworu, a nie podczas eksploatacji obiektu. W 2008 r. odnotowano jeden niekontrolowany dopływ płynu złożowego do odwiertu (erupcja wstępna), w czasie wykonywania zabiegu rekonstrukcji odwiertu Swarzów-17 w PMG Swarzów. Powyższe dane pochodzą ze sprawozdań dotyczących stanu bezpieczeństwa i higieny pracy w górnictwie, dostępnych na stronie Wyższego Urzędu Górniczego (www.wug.gov.pl). Ważniejsze wypadki związane z ucieczką gazu z magazynu zlokalizowanego w wyeksploatowanych złożach węglowodorów na świecie odnotowano w 2001 i w 2015 r. w Stanach Zjednoczonych (dane pochodzą z raportu bezpieczeństwa Departamentu Energii – www.energy.gov). W pierwszym przypadku (Yaggi UGS, Kansas, Stany Zjednoczone) nastąpiła ucieczka pozioma gazu na odległość ponad 8 km, gdzie poprzez kilka starych otworów wiertniczych gaz wydostał się na powierzchnię i nastąpiła eksplozja, która spowodowała zniszczenia obiektów budowlanych oraz dwie ofiary śmiertelne. Drugim zdarzeniem był ogromny wyciek gazu z podziemnego składowiska w Kalifornii (Aliso Canyon Storage Field, Kalifornia, Stany Zjednoczone). Zdarzenie to uchodzi za największą historii ucieczkę metanu z podziemnego magazynu. Katastrofa ta spowodowała konieczność ewakuacji kilku tysięcy rodzin, a zamknięcie wycieku, mimo wielu prób, było bezskuteczne. Dopiero wykonanie otworu obniżającego ciśnienie pozwoliło na jego zatrzymanie.

W celu zminimalizowania opisanych zagrożeń dla każdego obiektu przeprowadza się ocenę:
– przebiegu dotychczasowego rozpoznania i eksploatacji;
– stanu technicznego stalowych kolumn rur okładzinowych w odwiertach eksploatujących złoże;
– szczelności odwiertów przeznaczonych do zatłaczania i odbioru gazu.

Z analizy zebranych archiwalnych dokumentacji geologiczno-inżynierskich wynika, że ich autorzy dokonywali wyłącznie przeglądu literatury, zarówno krajowej, jak i zagranicznej. Brak jednak szczegółowych badań i analiz wyników badań z istniejących otworów opracowanych na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, a wnioski sformułowane są na podstawie niepublikowanych danych badaczy polskich, amerykańskich i rosyjskich. W nielicznych przypadkach są przytaczane wyniki geofizycznych badań kontrolnych, które potwierdzają np. szczelność obudowy otworów. Dla przykładu, wykorzystując dane z projektu badawczego na złożu Tarnów I, oszacowano korozyjne zużycie rur mniejsze niż 1,5–2,5 mm w ciągu 24 lat. Wyniki te poparto danymi literaturowymi z doświadczeń amerykańskich oraz rosyjskich, w których, bazując na wynikach badań profilometrycznych, określono zużycie rur nie przekraczające 1 mm przez 30 lat funkcjonowania PMG (Zawisza i in., 2011). W tym samym opracowaniu autorzy ze względów bezpieczeństwa odradzają wykorzystywanie rur okładzinowych oraz płaszcza uszczelniającego do zatłaczania otworów poeksploatacyjnych. Powodem takiego podejścia jest możliwość wystąpienia korozji rur okładzinowych oraz płaszcza uszczelniającego, co zwiększa ryzyko migracji gazu. Jeżeli jednak mają by wykorzystane, to należy je dokładnie zbadać z zastosowaniem metod geofizycznych oraz prób szczelności i dokonać ich rekonstrukcji.

5.2. ZAGROŻENIA W FORMACJACH WODONOŚNYCH

Zagrożenia wynikające z czynników geologicznych szczegółowo opisano wcześniej w rozdziale 4. Przy dobrym geologicznym i hydrogeologicznym rozpoznaniu formacji wodonośnej dużą rolę będą odgrywały czynniki techniczne mogące spowodować wystąpienie komplikacji w fazie eksploatacji obiektu. W obiektach zlokalizowanych w formacjach wodonośnych substancję lub odpad zatłacza się poprzez odpowiednio skonstruowane otwory tłoczne. Jak już wcześniej wspomniano, otwory stanowią najsłabsze ogniwo obiektu podziemnego. Mogą w nich (lub w ich sąsiedztwie) wystąpić awarie techniczne wynikające z uszkodzenia pomp, rurociągów, zbiorników oraz instalacji do zatłaczania. Uszkodzenia te mogą być skutkiem ludzkiego błędu lub wad materiałowych. Otwór stanowi także potencjalną drogę wycieku substancji z obiektu podziemnego w wyniku m.in. uszkodzenia głowicy otworu, orurowania lub połączeń rurowych (Uliasz-Misiak, 2008). Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na trwałość otworu jest ewentualna korozja rur okładzinowych. W celu jej ograniczenia stosuje się w otworze tzw. inhibitory korozji (Macuda, Zawisza, 2006).

W przypadku składowania odpadów ciekłych w formacji wodonośnej za pomocą otworów tłocznych, w celu zminimalizowania wpływu tej działalności na środowisko, istotne jest właściwe odizolowanie otworu od wszystkich napotkanych poziomów wodonośnych (w szczególności użytkowych).

Z tego powodu ogromną rolę odgrywa szczelność poszczególnych kolumn rur osłonowych. Szczelność zapewnia się przez cementowanie, którego jakość należy ocenić wykonując każdorazowo (po każdym cementowaniu) próby szczelności (Ślizowski K., 2002).

W przypadku składowania lub magazynowania w warstwach wodonośnych komplikacje w fazie eksploatacji obiektu mogą wynikać z następujących czynników pozageologicznych (Macuda, Zawisza, 2006):

– błędów projektowych w konstrukcji otworu chłonnego lub stacji do zatłaczania odpadów;
– kolmatacji ośrodka porowatego w strefie przyodwiertowej (w związku z osadzaniem się cząstek stałych w porach);
– niewłaściwego doboru składu chemicznego odpadów pod kątem zgodności hydrochemicznej z ośrodkiem porowatym.

Najsłabiej są rozpoznane zagrożenia związane ze składowaniem CO_2 w formacjach wodonośnych. O ile potencjalne ścieżki migracji gazu oraz jej mechanizmy są stosunkowo łatwe do określenia na podstawie doświadczenia z innymi gazami, to nie są znane długoterminowe konsekwencje jego składowania (Uliasz-Misiak, 2008). Słabo rozpoznana jest także możliwość przepływu solanki z warstwy chłonnej do innej formacji wodonośnej, co może spowodować znaczną zmianę jej jakości.

5.3. ZAGROŻENIA W KOMORACH SOLNYCH

W przypadku lokalizowania obiektu w wyługowanych komorach solnych obserwuje się znaczny wpływ czynników technicznych na możliwość wystąpienia zagrożeń. Przy założeniu, że wszystkie czynniki geologiczne opisane wcześniej (rozdz. 4) zostały uwzględnione podczas ługowania komór, w fazie eksploatacji obiektu możliwe zagrożenia wynikają najczęściej z czynników technologicznych i technicznych. Do najistotniejszych zagrożeń należy zaliczyć:

– deformacje komór magazynowych, w wyniku zaciskania się pustek (konwergencji) lub zmiany składu chemicznego skał otaczających pod wpływem działania węglowodorów;
– awarię elementów otworu lub niewłaściwą jego cementację;
– utratę szczelności obiektu na skutek zeszczelinowania górotworu;
– przepełnienie magazynu;
– erupcje gazu lub wypływ solanki.

Jedną z większych awarii była erupcja gazu w podziemnym kawernowym magazynie gazu w Stanach Zjednoczonych (Moss Bluff UGS, Texas, Stany Zjednoczone). Erupcja nastąpiła przez głowicę otworu w wyniku awarii rury wolnowiszącej. Zabezpieczenia znajdujące się w głowicy nie zadziałały z powodu korozji niektórych elementów (dane pochodzą z raportu bezpieczeństwa Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych Ameryki – www.energy.gov).

Ocenę deformacji kształtu komór w procesie ługowania dokonuje się dzięki systematycznym pomiarom komór pod kątem ewentualnych, nagłych zmian ich kształtu. Z uwagi na właściwości reologiczne soli (występowanie odkształceń sprężysto-plastycznych, zależnych od wielkości obciążeń oraz odkształceń lepkich związanych ze zjawiskiem pełzania, które narastają w czasie nawet przy stałym poziomie naprężeń) może się pojawić zjawisko konwergencji (stopniowe zaciskanie się wyrobiska solnego). Wówczas w miarę upływu czasu będzie się zmniejszać pojemność robocza komory magazynowej. Nadmierna konwergencja może być źródłem dodatkowych naprężeń wpływających na stateczność komory lub zespołu komór. Wartości konwergencji w obrębie wysadów solnych zależą w dużej mierze od mechanicznych parametrów soli. Na przykład, wielkość konwergencji, mierzona ilością wypływającej solanki z wyeksploatowanych lub będących w końcowej fazie eksploatacji komór, w obrębie wysadu Góra wykazuje tendencję spadkową i stabilizuje się na niskim poziomie ok. 0,25 promila/rok, więc nie zagraża stabilności górotworu (Jurczak i in., 2006).

Do wcześniej wymienionych zagrożeń dochodzą jeszcze problemy ekologiczne, które mogą się pojawić podczas budowy magazynu. Poniżej wymieniono zagadnienia, które trzeba uwzględniać i rozwiązywać bezpośrednio podczas budowy magazynów kawernowych:

– utylizacja odpadów z wiercenia (głównie płuczek);
– wycieki solanki w czasie testów szczelności;
– zrzut solanki z procesu ługowania;
– zanieczyszczenia środowiska substancjami technicznymi (olejami, smarami itp.);
– emisja hałasu.

Solanka negatywnie wpływa na glebę i przyczynia się do zachwiania równowagi makro- i mikroelementów, co wynika z dużej zawartości anionów chlorkowych i kationów sodowych lub potasowych. Chlorki, które są jednym ze składników płuczek solnych oraz bardzo zasolonych odpadów wiertniczych, w razie przedostania do środowiska mogą spowodować znaczne zasolenie gleby, w skutek czego dojdzie do uszkodzenia roślin i zahamowania ich wzrostu (Galiniak, 2003).

Analiza wpływu Podziemnych Kawernowych Magazynów Gazu (PKMG) na elementy środowiska naturalnego, uwzględniająca fazę jego budowy i eksploatacji, pozwoliła stwierdzić, że (Galiniak, 2003):

– jeżeli podczas budowy magazynu są przestrzegane przepisy zobowiązujące do ochrony środowiska przyrodniczego i prowadzona jest racjonalna gospodarka płuczkami i odpadami wiertniczymi, to ujemny wpływ budowy na środowisko jest znacznie zminimalizowany;
– magazyny te nie są zaliczane do obiektów uciążliwych dla środowiska, o ile jedynymi zanieczyszczeniami emitowanymi do atmosfery są dwutlenek azotu, tlenek węgla i alkohol metylowy;
– jeżeli magazynowany gaz zawiera w swym składzie węglowodory aromatyczne, to istnieje znaczne zagrożenie dla czystości powietrza atmosferycznego;

– dużą uciążliwością dla środowiska może być emisja hałasu.

Minimalizowanie wyżej opisanych zagrożeń uzyskuje się np. przez odpowiednie zaprojektowanie komór z uwzględnieniem wielu kryteriów górniczych wynikających z technologii ługowania i wymagań geomechanicznych, z których najważniejsze to (Guarascio, 1998; Ślizowski K. i in., 2009; Chromik, 2015; Lankof, 2018; Matos i in., 2019) (tab. 12):

– średnica kawerny nie powinna przekraczać 2/3 jej wysokości dla zachowania regularnego kształtu wyrobiska;
– stropowa półka bezpieczeństwa powinna wynosić co najmniej 30 m;
– spągowa półka bezpieczeństwa, ze względu na kąt położenia warstw w spągu, nie powinna być mniejsza niż 5–10 m;
– kawerna powinna mieć kopułę zabezpieczającą przed wystąpieniem naprężeń rozciągających o wysokości 1/3–1/2 średnicy kawerny (D) oraz szyję o długości min. 15 m dla zapewnienia długotrwałej szczelności i stateczności;
– półka stropowa i spągowa oraz szyja komory powinny łącznie mieć grubość min. 50 m;
– wysokość wrębu, w którym gromadzą się części nierozpuszczalne, powinna wynosić ok. 1/6 średnicy kawerny (D);
– efektywna objętość magazynowa kawerny, pomniejszona o wielkość zasypu wraz z solanką rezydualną, powinna stanowić 90% jej objętości geometrycznej;
– stosunek średnicy kawerny (D) do rozstawu otworów (L) dla magazynowania gazu na głębokości magazynowania ok. 500–600 m powinien wynosić min. ok. 1:3,5;
– odległość między komorami (w przypadku więcej niż jednej w tej samej strukturze) powinna być odpowiednio dobrana;
– szczelność otworu/kawerny potwierdzona testem szczelności z zastosowaniem azotu (ubytek gazu nieprzekraczający 150 kg/dobę);
– szczelność otworu musi być zapewniona przez wyposażenie cementowanej kolumny otworu magazynowego w gazoszczelne złączki lub kolumna będzie spawana i odpowiednio gazoszczelnie zacementowana;
– odpowiednio dobrane ciśnienie na bucie ostatniej cementowanej kolumny w trakcie budowy i eksploatacji magazynu nie może przekraczać wartości ciśnienia szczelinowania;
– dostępność wody potrzebnej do ługowania kawern;
– możliwość odprowadzenia solanki z procesu ługowania;
– korzystne warunki geologiczno-inżynierskie, żeby nie doszło do uszkodzenia instalacji (brak osuwisk, obszar asejsmiczny itp.).

Powyższe zalecenia są dobrym przykładem minimalizowania ewentualnych zagrożeń na każdym etapie realizacji obiektu podziemnego.

5.4. ZAGROŻENIA W WYROBISKACH KOPALŃ PODZIEMNYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM KOPALŃ SOLI

W przypadku magazynowania lub składowania w wyrobiskach kopalń podziemnych czynniki geologiczne omówione w rozdziale 4 są w dużej mierze uwzględnione i dobrze rozpoznane w trakcie działalności eksploatacyjnej kopalni. Wiele zagrożeń jest minimalizowanych dzięki odpowiednio realizowanemu projektowi zagospodarowania złoża lub prowadzeniu robót górniczych zgodnie z zasadami zawartymi w planie ruchu zakładu górniczego i planie monitoringu. Dużym utrudnieniem jest magazynowanie lub składowanie w wyznaczonej części czynnej kopalni, gdyż jej praca może generować wiele zagrożeń górniczych, w tym szczególnie wstrząsy indukowane np. w wyniku robót strzałowych, a ich wpływy mogą się wzajemnie nakładać lub zwiększać.

Zagrożenia technologiczne w dużej mierze będą zależały od zastosowanej technologii wprowadzania substancji lub odpadu do komór. Składowanie z zastosowaniem podsadzania będzie zwiększać stateczność geomechaniczną górotworu, gdyż nastąpi wzmocnienie filarów międzykomorowych oraz osłabienie zaciskania się wyrobisk. Zagrożenia związane ze składowaniem odpadu w opakowaniach będą zależały od ich rodzaju, ilości oraz rodzaju opakowania. Mogą być spowodowane rozszczelnieniem np. pojemników i reakcją pomiędzy odpadem a górotworem.

W przypadku adaptacji kopalń podziemnych na magazyn lub składowisko duże znaczenie dla bezpieczeństwa obiektu podziemnego będą miały możliwe zagrożenia górnicze, które mogą wystąpić zarówno na etapie eksploatacji, jak i adaptacji komór na magazyn lub składowisko.

W kopalniach podziemnych jasno określone są możliwości **zagrożeń górniczych**. Potencjalne zagrożenia w kopalniach można podzielić na trzy grupy:

– zagrożenia wodne;
– zagrożenia gazowe (głównie metanowe);
– zagrożenia wyrzutami gazów i skał.

Zagrożenia wodne. Potencjalne zagrożenie wodne w kopalni soli stwarzają: wody pochodzące z nadległych i otaczających złoże poziomów wodonośnych (pozazłożowe) oraz wody wewnątrzzłożowe. Wody pozazłożowe mogą stwarzać dla kopalń soli poważne zagrożenie. Drogi dopływu tych wód do wyrobisk kopalnianych mogą powstawać podczas eksploatacji, a także po jej zakończeniu. Udrożnienie górotworu może nastąpić poprzez:

– szyby kopalniane (tzn. migrację wód za obudową);
– nieprawidłowo zlikwidowane otwory wiertnicze;
– niezachowanie lub naruszenie filarów: bezpieczeństwa, granicznych, ochronnych;
– rozwój spękań w tych filarach – wywołany nadmiernymi naprężeniami w górotworze;
– strefy odprężenia i rozluźnienia powstające w wyniku wyrzutów gazów i skał.

Wody wewnątrz złoża stanowią mniejsze zagrożenie. Są to wody (ługi, solanki) zamknięte w złożu solnym na różnych etapach jego formowania się oraz powstałe w wyniku metamorfizmu skał solnych.

Na podstawie analizy zaistniałych na świecie (Polska, Kanada, Kongo, Rosja, Ukraina, Stany Zjednoczone, Niemcy, Wielka Brytania) licznych awaryjnych dopływów wody do kopalń soli w ostatnich dekadach (Stryczniewicz i Kasietczuk, 2016; Poborska-Młynarska, 2018) można wyróżnić pewne charakterystyczne okoliczności i przyczyny tych zdarzeń, które wynikają z trudnych warunków geologicznych lub niewłaściwie zastosowanej technologii. Spośród nich najważniejsze to:

– niewłaściwa likwidacja otworów badawczych;
– nieprawidłowa likwidacja otworów mrożeniowych wykorzystanych podczas zgłębiania szybu;
– nieszczelna obudowa szybu i migracja wód poza obudową;
– niezamierzone przebicie się robotami górniczymi do obszaru naturalnego zbiornika lub poziomu wodonośnego;
– brak rozpoznania wszystkich zjawisk geologicznych;
– samoczynne udrożnienie naturalnych dróg dopływu lub powstanie nowych, na skutek rozwoju krasu w złożu i w konsekwencji samoczynne ługowanie spowodowane wieloletnim drenażem nieuszczelnionego wypływu;
– udrożnienie naturalnych lub powstanie nowych dróg dopływu wskutek oddziaływania robót górniczych, zwłaszcza opartych na technice strzelniczej;
– powstanie obszarów nieciągłości górotworu (spękania, szczeliny, rozwarstwienia) wynikających z obciążenia górotworu długotrwałą eksploatacją i deformacjami;
– utrata stateczności wyrobisk wskutek samoczynnego zawału stropów wyrobisk;
– niewłaściwe wymiary pozostawionych filarów ochronnych i/lub półek.

Skutkami negatywnego oddziaływania wody na górotwór solny i jego bezpośrednie otoczenie mogą być powstające i rozwijające się w czasie pustki podziemne, które w konsekwencji mogą doprowadzić do zawału pojedynczych wyrobisk lub większego obszaru pola eksploatacyjnego. Mogą również spowodować istotne obniżenia terenu czy nawet zapadliska na powierzchni. W przeszłości notowano przypadki większych katastrof związanych z całkowitym samozatopieniem kopalni (np. kopalnia Wapno, 1977 r.). Wskazane powyżej doświadczenia dowodzą, że w kontekście zagrożenia, szczególnie wodnego, dla kopalni soli przede wszystkim istotna jest odpowiednio zaprojektowana profilaktyka, mająca na celu niedopuszczenie do uaktywnienia się dróg dopływu do wyrobisk kopalnianych, która powinna być uwzględniana na każdym etapie zagospodarowywania złoża, począwszy od wiercenia otworów badawczych. W przypadku pojawienia się jakichkolwiek śladów dopływu wody należy zidentyfikować źródło i dążyć do jego zablokowania (np. przez uszczelnianie i tamowanie). W ten sposób uniknie się ciągłego dopływu, który powodowałby systematyczne rozpuszczanie soli i rozwój krasu solnego, a w konsekwencji awarię wodną.

Dla podziemnych zakładów górniczych wydobywających sól ustalono trzy stopnie zagrożenia wodnego w zależności od obecności lub braku warstwy izolującej między złożem a występującymi w jego otoczeniu zbiornikami wodnymi (Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 21 września 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych).

Zagrożenia gazowe. Metan jest gazem lżejszym od powietrza, wypierającym tlen w atmosferze i łatwopalnym. W stanie wolnym występuje przede wszystkim w złożach gazu ziemnego, towarzyszy eksploatacji ropy naftowej i węgla kamiennego. Przy określonych granicach zawartości w powietrzu (5–15%), tworzy z nim mieszaninę wybuchową. Dla podziemnych kopalń soli ustalono dwie kategorie zagrożenia metanowego (Obwieszczenie..., 2015) w zależności od stwierdzonej zawartości metanu w powietrzu wentylacyjnym.

Zagrożenia wyrzutami gazów i skał. Zjawisko wyrzutu skał i gazów dotyczy różnych typów kopalń i związane jest z nagłym i intensywnym wydzieleniem się gazu (metanu, dwutlenku węgla i in.) do atmosfery kopalnianej wraz z rozkruszoną masą skał, wyrzuconą na znaczną odległość, najczęściej wskutek przekroczenia naprężeń krytycznych przekraczających lokalną wytrzymałość ośrodka skalnego, w którym uwięziony był gaz. W efekcie taki wyrzut może doprowadzić do powstania atmosfery niezdatnej do oddychania lub wybuchowej. Dla kopalni soli są zdefiniowane trzy kategorie zagrożeń (Obwieszczenie..., 2015) w zależności od braku lub występowania wyrzutów o określonej masie skał.

6. PRZEGLĄD KRAJOWYCH STRUKTUR GEOLOGICZNYCH I OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

W części I poradnika w rozdziale 8 opisano uwarunkowania prawne lokalizowania podziemnych magazynów i składowisk. Ogólną charakterystykę formacji i struktur przydatnych do podziemnego magazynowania podano w rozdziale 2, natomiast kryteria wyboru struktur przedstawiono w rozdziale 4. Poniżej scharakteryzowano obecnie zagospodarowane oraz perspektywiczne struktury krajowe, w tym także kopalnie, w których taka działalność jest planowana lub możliwa.

W Polsce składowanie i/lub magazynowanie odbywa się jedynie w dwóch typach struktur: solnych oraz wyeksploatowanych złożach węglowodorów. Natomiast analizy przydatności struktur do bezpiecznego składowania odpadów, magazynowania gazu i paliw płynnych oraz składowania dwutlenku węgla były i są przedmiotem licznych opracowań wykonywanych przez różne jednostki naukowo-badawcze i ośrodki rozwojowe od początku lat 50. ub. stulecia (np. Górecki i in., 2004; Czapowski, Bukowski, 2010; Wójcicki i in., 2013).

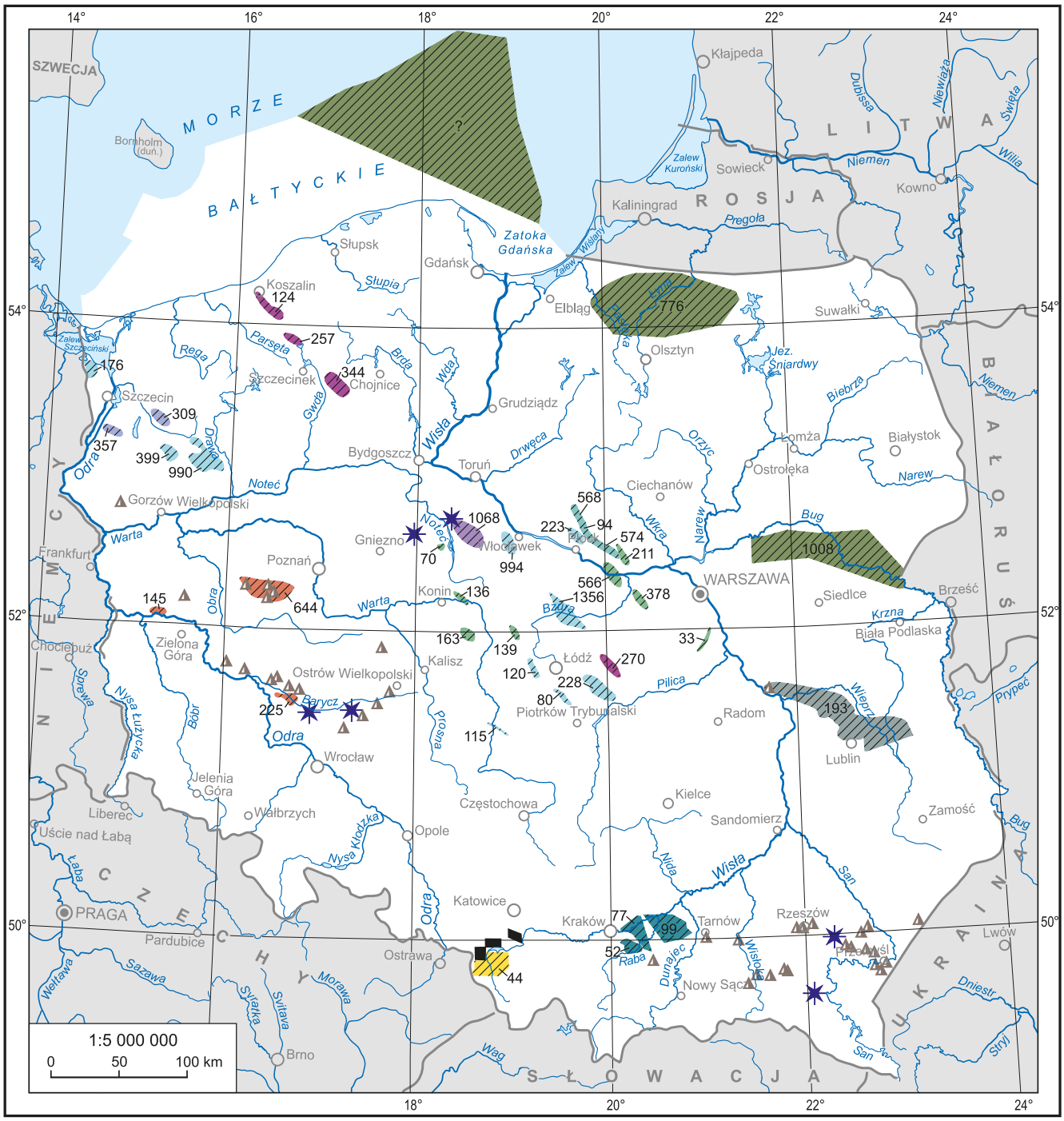
W związku z przyjęciem przez rząd RP „Polityki energetycznej Polski do 2040 r." (Polityka..., 2021; dalej zwane PEP 2040), zapotrzebowanie na magazyny będzie wzrastać. Jednym z wiodących kierunków PEP 2040 jest dywersyfikacja dostaw gazu i ropy oraz rozbudowa infrastruktury sieciowej. W celu zapewnienia rozwoju rynku gazu planowana jest rozbudowa sieci przesyłowej i dystrybucyjnej oraz budowa nowych podziemnych magazynów gazu. Zgodnie z polityką energetyczną z punktu widzenia bezpieczeństwa energetycznego bardzo istotna jest odpowiednia pojemność i możliwości odbioru gazu z podziemnych magazynów. Zgodnie z PEP 2040 rozbudowa pojemności magazynowych gazu ziemnego oraz wykorzystanie kawern solnych zapewni lepsze warunki popularyzacji tzw. gazów zdekarbonizowanych, tj. biogazu, biometanu i wodoru. Łączna pojemność siedmiu podziemnych magazynów gazu wysokometanowego (PMG) wynosi ok. 3,2 mld m^3, co stanowi blisko 1/6 rocznego krajowego zużycia (Polityka..., 2021). W związku ze wzrostem bezpieczeństwa energetycznego celowe jest prowadzenie rozbudowy PMG do poziomu min. 4 mld m^3 (wzrost o 1/3 pojemności) oraz zwiększenie aktualnej maksymalnej mocy odbioru gazu z instalacji magazynowych – z 53,5 mln m^3/dobę do min. 60 mln m^3/dobę (wzrost o ok. 1/6 mocy) dla sezonu zimowego 2030/2031. Istotnym elementem strategicznym w zakresie infrastruktury paliwowej jest także baza magazynowa ropy naftowej i paliw ciekłych. Z tego powodu w PEP 2040 przewidziano budowę nowych magazynów kawernowych.

Rozwojowi będzie podlegać także rynek wodoru jako element zmiany surowcowej na rynku paliw, polegającej na wykorzystywaniu w transporcie paliw alternatywnych innych niż OZE. Jednym z głównych celów strategii wodorowej (Uchwała nr 149, 2021) jest sprawny i bezpieczny przesył, dystrybucja i magazynowanie wodoru. Na mocy uchwalonej strategii ma powstać prawo krajowe regulujące rozwój rynku wodoru. Obecnie ze względu na brak opłacalności wykorzystania tego gazu na potrzeby energetyczne, technologia ta jest na niskim poziomie rozwoju. Jednakże ze względu na jego właściwości fizyczne (jest lekki, reaktywny, można go magazynować, ma wysoką zawartość energii na jednostkę masy), ekologiczny charakter (produktem jego spalania jest jedynie para wodna) oraz duże możliwości produkcyjne przedsiębiorstw w Polsce (ok. miliona ton rocznie), kwestia jego wykorzystania coraz częściej budzi zainteresowanie (Polityka..., 2021). Pożądana jest sytuacja, żeby produkcja wodoru była w przyszłości realizowana przy wykorzystaniu OZE, także jako sposób zagospodarowania nadwyżek produkcji energii z użyciem instalacji typu power-to-gas (Polityka..., 2021). W Polsce już od kilku lat powstają publikacje dotyczące możliwości bezpiecznego magazynowania wodoru w strukturach geologicznych (np. Tarkowski, 2017; Lewandowska-Śmierzchalska i in., 2018; Czapowski, 2019; Such, 2020; Szpunar, Budak, 2020).

Zwiększenie pojemności magazynów gazu było też głównym celem „Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2030" (Uchwała nr 239, 2011). Zwiększenie pojemności magazynowych przewidziano dla PMG: Husów, Brzeźnica, Wierzchowice, Strachocina i Mogilno. Powstał także kawernowy magazyn Kosakowo (działa od 2014 r.). Ponadto obecnie są prowadzone analizy możliwości zwiększenia pojemności magazynowej PMG Wierzchowice z 1200 mln^3 do 2000 mln m^3 (https://pgnig.pl/).

Konsekwencją tych tendencji jest rosnąca liczba projektów badawczych, mających na celu wskazanie potencjalnych struktur geologicznych do magazynowania i składowania z uwzględnieniem również ewentualnych zmian w prawie dotyczących dwutlenku węgla i wodoru.

W poniższym rozdziale scharakteryzowano krótko najbardziej perspektywiczne do magazynowania i/lub składowania struktury geologiczne w Polsce. Perspektywiczne lokalizacje dla składowania dwutlenku węgla, które mogłyby być rozpatrywane również jako potencjalne lokalizacje dla magazynowania substancji i składowania odpadów przedstawiono poniżej (rys. 19).



potencjalne składowiska w solankowych poziomach wodonośnych (kolorem zaznaczono wiek głównego kolektora, liczba oznacza szacowaną pojemność składowiska w Mt CO_2)

miocen

kreda dolna

jura dolna + środkowa, kreda dolna

jura dolna

trias górny, jura dolna

trias dolny, jura dolna + środkowa

trias dolny

perm dolny

karbon

kambr

paleozoik i mezozoik (w podłożu orogenu karpackiego i jego przedpola)

potencjalne składowiska w złożach węgla kamiennego (pojemność poniżej 10 Mt CO_2)

potencjalne składowiska w złożach gazu ziemnego i ropy naftowej (pojemność znacznie poniżej 100 Mt CO_2)

podziemne magazyny gazu ziemnego i paliw o dużej pojemności

Rys. 19. Potencjalne struktury do składowania CO_2 z możliwością przeanalizowania ich pod kątem magazynowania substancji i składowania odpadów (Nawrocki, Becker, 2017)

6.1. PRZEGLĄD KRAJOWYCH STRUKTUR GEOLOGICZNYCH I ZAKŁADÓW GÓRNICZYCH PRZYDATNYCH DO PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA SUBSTANCJI LUB PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA ODPADÓW

6.1.1. Formacje złóż węglowodorów

Badania dotyczące wykorzystania struktur geologicznych na podziemne magazyny gazu były przedmiotem opracowania pt. „Analiza możliwości wykorzystania sczerpywalnych złóż węglowodorów, zawodnionych horyzontów i wybranych warstw wodonośnych na podziemne magazyny gazu ziemnego" (Górecki, 2004). Przedmiotem studiów były głównie sczerpane złoża gazu. Dla niemal trzech takich złóż gazu ziemnego, rozpatrywanych także w ramach przedsięwzięcia pn. „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Wójcicki i in., 2013), przedstawiono ocenę ich ewentualnej przydatności na PMG wraz z założeniami do projektów robót geologicznych. Ponadto dla jednej struktury wodonośnej (solankowej) – Ponętów (nie została ona zakwalifikowana w temacie sekwestracyjnym jako potencjalne składowisko CO_2, z uwagi na nieodpowiednie parametry uszczelnienia i zbyt małą pojemność) wykonano ocenę jej ewentualnej przydatności na PMG oraz przygotowano założenia do projektu robót geologicznych na potrzeby szczegółowego rozpoznania potencjalnego PMG. W opracowaniu scharakteryzowano wyniki wybranych przedsięwzięć, mających na celu wskazanie i przeanalizowanie struktur geologicznych (sczerpanych złóż węglowodorów i struktur w poziomach wodonośnych solankowych) najbardziej odpowiednich do składowania/magazynowania gazów/płynów (zasadniczo dwutlenku węgla i gazu ziemnego, gdyż dla tych substancji są w miarę precyzyjnie zdefiniowane kryteria przydatności struktur do bezpiecznego składowania/magazynowania). Wszystkie opisane struktury są potencjalnymi obiektami podziemnymi – żadna z nich nie została dotąd zagospodarowana i nie wybudowano eksploatującego górotwór zakładu górniczego.

W przypadku geologicznego składowania dwutlenku węgla (sekwestracji CO_2) wyczerpujące analizy takich struktur przeprowadzono w latach 2008–2012, w ramach opracowania na zlecenie Ministerstwa Klimatu i Środowiska (Wójcicki, 2013; skladowanie.pgi.gov.pl) (rys. 20).

W przypadku złóż węglowodorów wskazano 38 struktur jako użytecznych do sekwestracji (niektóre z nich to złoża wieloczęściowe i wielohoryzontowe) o odpowiedniej wielkości pierwotnych zasobów wydobywalnych i odpowiednim stopniu sczerpania (często eksploatowanych od dziesiątków lat). Wyznaczono 10 złóż ropy naftowej (w ich przypadku dwutlenek węgla byłby wykorzystywany najpierw do wspomagania wydobycia ropy, a dopiero po zakończeniu tego procesu nastąpiłoby właściwe składowanie) oraz 28 złóż gazu ziemnego.

Z analizy opracowań regionalnych wynika, że najwięcej wytypowanych złóż ropy naftowej znajduje się na obszarze Niżu Polskiego (basen permski – utwory cechsztynu; północno-zachodnia część Polski), następnie w Karpatach (płaszczowiny karpackie), w zapadlisku przedkarpackim (utwory miocenu miocen i podłoża mezopaleozoiczne) i w polskiej strefie ekonomicznej Bałtyku (utwory kambru). Natomiast złoża gazu ziemnego znajdują na obszarze Niżu Polskiego (basen permski – utwory czerwonego spągowca oraz cechsztynu, rzadziej także podłoże karbońskie, jedno złoże w utworach górnego karbonu we wschodniej części Polski) i w zapadlisku przedkarpackim (utwory miocenu i podłoża mezopaleozoicznego). Potencjał geologicznego składowania CO_2 dla tych struktur nie jest znaczny, odpowiada mniej więcej 4-letniej emisji polskich zakładów przemysłowych objętych systemem handlu emisjami ETS (https://kobize.pl/). Jednak struktury takie mogą być stosunkowo łatwo i bezpiecznie wykorzystane do składowania innych gazów/płynów. Wiele sczerpanych złóż gazu ziemnego wykorzystuje się jako podziemne magazyny gazu – nie ujęto ich w tabelach 21 i 22, gdyż są już zagospodarowane na magazyny, omówiono je natomiast w podrozdziale 6.2.

Tabela 21

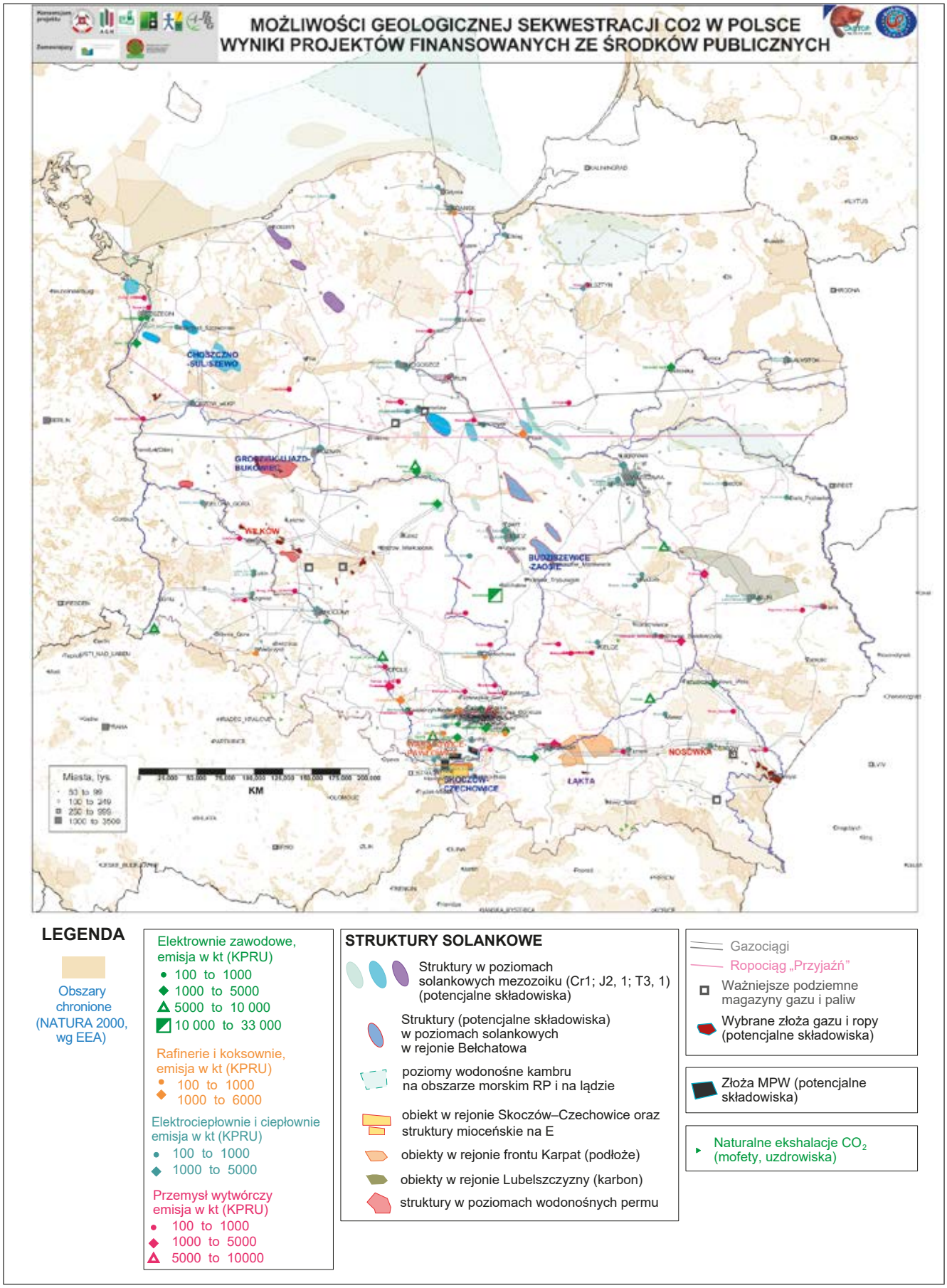
Bilans pojemności składowania dla wytypowanych złóż ropy naftowej w Polsce w rozbiciu na rejony (Wójcicki i in., 2013)

Rejon	Bałtyk	Niż Polski	Zapadlisko przedkarpackie	Karpaty	RAZEM
Liczba struktur	1,0	4,0	2,0	3,0	10,0
Pojemność [mln t]	7,0	40,7	7,5	13,0	68,2

Tabela 22

Bilans pojemności składowania dla wytypowanych złóż gazu ziemnego w Polsce w rozbiciu na rejony (Wójcicki i in., 2013)

Rejon	Bałtyk	Niż Polski	Zapadlisko przedkarpackie	Karpaty	RAZEM
Liczba struktur	0	16,0	12,0	0	28,0
Pojemność [mln t]	0	310,2	396,3	0	706,5



Rys. 20. Możliwości geologicznego składowania CO_2 w Polsce, w tym lokalizacja wytypowanych struktur geologicznych (https://skladowanie.pgi.gov.pl/)

W szeregu sczerpanych złóż (względnie w ich sczerpanych częściach) prowadzi się składowanie odpadów płynnych i gazowych, pochodzących z procesów wydobycia węglowodorów:

– w niemal sczerpanym złożu gazu ziemnego Borzęcin (południowa część basenu permskiego, w utworach czerwonego spągowca) prowadzi się zatłaczanie gazu kwaśnego będącego odpadem z oczyszczania gazu ziemnego wydobywanego z tego złoża z niepożądanych składników, tzn. mieszaniny dwutlenku węgla i siarkowodoru (ok. 80% CO_2 i ok. 20% H_2S oraz śladowe ilości węglowodorów; Lubaś i in., 2020) do podścielających horyzont gazonośny wód złożowych, oraz odpadów płynnych z eksploatacji złóż węglowodorów zlokalizowanych na obszarze basenu permskiego (Lubaś, Szott, 2010; Pleśniak i in., 2017);
– w wyeksploatowanej części złoża Husów (jest to część wielkiego złoża gazu Husów–Albigowa–Krasne, zlokalizowanych w utworach miocenu w południowo-wschodniej części zapadliska przedkarpackiego) prowadzi się zatłaczanie odpadów płynnych z eksploatacji pobliskich złóż węglowodorów (https://pgnig.pl/);
– w sczerpanym i skreślonym z ewidencji złożu ropy naftowej i gazu ziemnego Świdnik zlokalizowanym w utworach górnego karbonu (Niż Polski, Lubelszczyzna) prowadzi się zatłaczanie odpadów płynnych z eksploatacji pobliskich złóż węglowodorów (op.cit.).

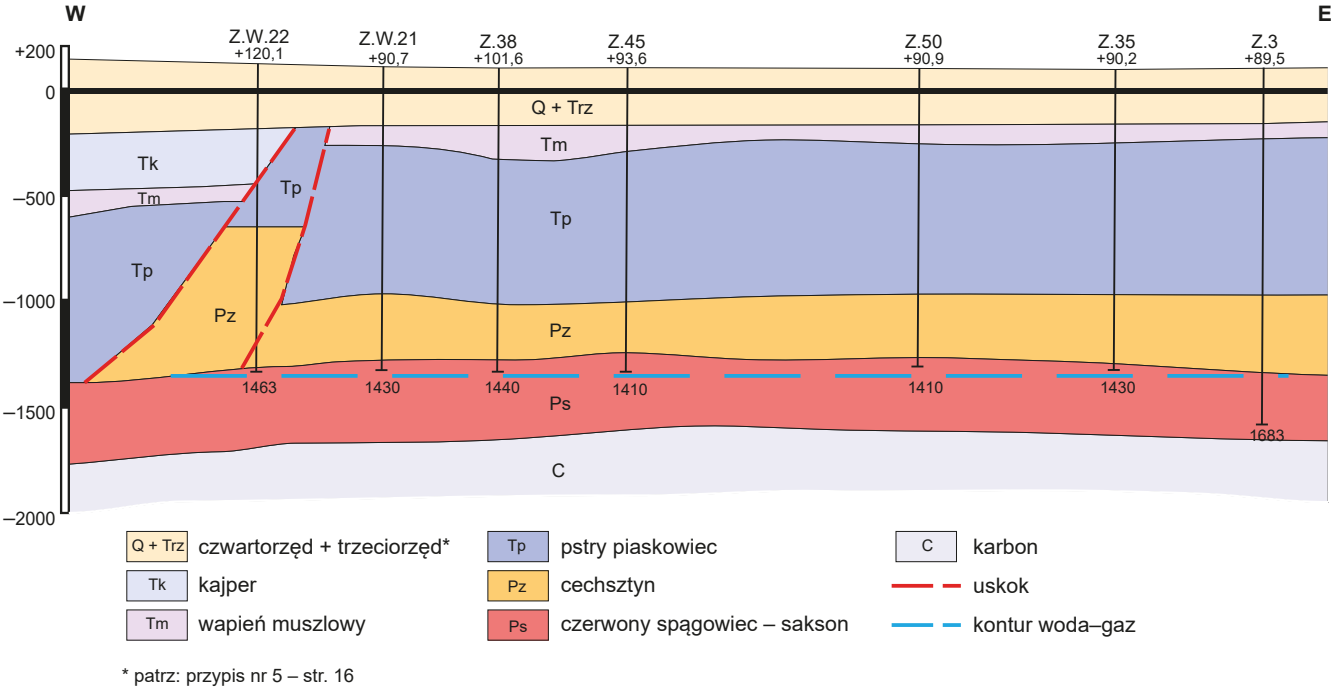
Odpady te to głównie odpady wydobywcze, w tym zużyte płuczki wiertnicze niezawierające substancji niebezpiecznych (kody 0105 wg katalogu odpadów, z wyłączeniem 010506 – Gluzińska i in., 2014).

Nie są znane szczegółowo plany grupy PGNiG S.A. dotyczące budowy podziemnych obiektów w złożach węglowodorów. Prace studialne dotyczące możliwości przekształcenia złóż ropy naftowej i/lub gazu na podziemne magazyny dotyczyły np. złóż Brzostowo, Czeszów, Żuchlów (Piesik-Buś, Zamojcin, 2015) na terenie województwa dolnośląskiego, a także złóż Tuligłowy i Jarosław (Piesik-Buś, 2016) na terenie zapadliska przedkarpackiego oraz złoża gazu ziemnego Załęcze (Piesik-Buś, 2010) w województwie wielkopolskim. Złoże Załęcze eksploatowane jest odwiertami od lat 70. ub. w. (aktualna koncesja wygasa w 2023 r.). Złoże jest częścią strefy złożowej niecki zielonogórskiej. Skałami zbiornikowymi są piaskowce czerwonego spągowca (perm), a akumulacja gazu występuje w najwyższej części brachyantykliny, na głębokości ok. 1300 m. Złoże to jest typu masywowego, od góry izolowane utworami formacji anhydrytowo-solnymi cechsztynu (rys. 21).

W złożu tym rozpatrywano na etapie prac studialnych konwersję na magazyn z wykorzystaniem dwutlenku węgla jako gazu buforowego (Piesik-Buś, 2010). Według symulacji pojemność czynna magazynu wynosiłaby ok. 9500 mln m^3, a dla CO_2 – ok. 83 mln t. Podobne symulacje dla pozostałych złóż wykazały możliwą pojemność czynną rzędu (Piesik-Buś, 2010; Piesik-Buś, Zamojcin, 2015; Piesik-Buś, 2016):

– złoże Tuligłowy – 1100 mln m^3;
– złoże Jarosław – 520 mln m^3;
– złoże Brzostowo – 1000 mln m^3;
– złoże Czeszów – 700 mln m^3;
– złoże Żuchlów – 12 000 mln m^3.

Teoretycznie zatem złoża te z powodzeniem mogłyby zostać przekształcone w magazyny, gdyż spełniają nie tylko trzy zasadnicze kryteria lokalizacji magazynu (strukturalne, zbiornikowe i szczelności), lecz również kryterium wielkości, tj. mogą zapewnić odpowiednią pojemność czynną.



Rys. 21. Schematyczny przekrój geologiczny przez złoże Załęcze (Piesik-Buś, 2010)

6.1.2. Formacje wodonośne

Potencjał składowania w formacjach wodonośnych (tzw. aquiferach) określono dla 46 struktur (pułapek strukturalnych, przeważnie w formie antyklin) występujących w Polsce w utworach od miocenu do dewonu. Najliczniej występują w centralnej części Polski oraz regionalnych zbiornikach – górnokarbońskim we wschodniej części Polski oraz kambryjskim na obszarze polskiej strefy ekonomicznej i obszarze lądowym w północno-wschodniej i wschodniej części Polski. W utworach mezozoiku mogą występować struktury podwójne (jedna nad drugą, np. jedna w utworach kredy, a druga – jury albo w obrębie jury i triasu, zwykle w obrębie struktur antyklinalnych powstałych nad poduszkami solnymi) lub np. w obrębie utworów jury może występować wiele poziomów zbiornikowych, przedzielonych warstwami skał o właściwościach uszczelniających. Spośród wspomnianych 46 struktur, obiekty zlokalizowane w utworach kredy uważane są za potencjalnie mniej bezpieczne do składowania dwutlenku węgla niż pozostałe, gdyż w ich nadkładzie uszczelniającym występują miąższe warstwy utworów węglanowych, mogące reagować z CO_2 rozpuszczonym w solance. Są one jednak odpowiednie do składowania innych gazów/płynów, podobnie jak pozostałe struktury. Potencjał geologicznego składowania CO_2 dla formacji wodonośnych w Polsce jest ogromny, odpowiadający ponad 70-letniej emisji polskich zakładów przemysłowych objętych systemem handlu emisjami ETS, natomiast dla samych 46 struktur – blisko 60-letniej emisji ETS (lub ok. 45-letniej emisji, jeżeli zostaną pominięte struktury w utworach kredy). Ogólnie struktury w formacjach wodonośnych – solankowych – mają znacznie większe pojemności niż struktury naftowe (sczerpane złoża gazu ziemnego i ropy naftowej), jednak ich szczegółowe rozpoznanie i monitoring na potrzeby zapewnienia bezpiecznego składowania CO_2 wymaga znacznych nakładów finansowych i szerokiego zakresu badań. Uwaga ta, chociaż w mniejszym stopniu, odnosi się także do wykorzystania takich struktur do magazynowania innych gazów/płynów. Podsumowanie pojemności formacji wodonośnych przedstawiono w tabeli 23.

Trzy struktury jurajskie położone w centralnej części Polski były rozpatrywane jako potencjalne składowiska dwutlenku węgla dla projektu demonstracyjnego PGE Bełchatów realizowanego w latach 2009–2013 (https://pgegiek.pl/Ochrona-srodowiska/CCS/Instalacja-demonstracyjna-CCS). Struktury te są zlokalizowane w rejonie Łodzi, na północny wschód od Bełchatowa. Jedna z nich (Budziszewice-Zaosie) była przedmiotem szczegółowych analiz w ramach wyżej omawianego przedsięwzięcia. Pozostałe dwie bardzo słabo rozpoznano, więc wykonano w ramach projektu demonstracyjnego rozpoznawcze prace geofizyczne (wysokorozdzielcze profile sejsmiczne i pomiary grawimetryczne) oraz odwierty badawcze. Jako planowane składowisko wybrano strukturę Wojszyce, położoną na północny wschód od Łodzi, ale zaraz po tym projekt demonstracyjny anulowano (w 2013 r.).

Ponadto w ramach przedsięwzięcia pt. „Program wspomagania wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego z krajowych złóż węglowodorów przy zastosowaniu podziemnego zatłaczania CO_2" (Lubaś i in., 2015), realizowanego w 2012 r. przez INiG-PIB oraz PIG-PIB na zlecenie MŚ i finansowanego ze środków NFOŚiGW, przeprowadzono analizy wykonalności wspomagania wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego przez zatłaczanie dwutlenku węgla dla 10 złóż (głównie ropy naftowej). Wspomniane 10 złóż zostało wybranych spośród analizowanych w latach 2008–2012, w ramach opracowania na zlecenie Ministerstwa Klimatu i Środowiska (Wójcicki i in., 2013), na podstawie rekomendacji specjalistów z PGNiG. Wykonano dla nich symulacje zatłaczania i produkcji węglowodorów oraz analizy ekonomiczne (Lubaś i in., 2015). Jak wspomniano wyżej, dwutlenek węgla byłby najpierw wykorzystywany do wspomagania wydobycia węglowodorów (zasadniczo ropy naftowej, w przypadku gazu ziemnego jest to znacznie mniej efektywne i opłacalne), a dopiero po zakończeniu tego procesu nastąpiłoby właściwe składowanie.

6.1.3. Formacje skalne słaboprzepuszczalne. Struktury solne

Utwory solne, obejmujące sole kamienne i sole potasowo-magnezowe, występują na obszarze Polski w obrębie czterech serii geologicznych (Hodbod, Czapowski, 2018; Mizerska, 2018; tab. 24):

- w permie – cechsztyn (w obrębie czterech cyklotemów od PZ1 do PZ4 – np. Wagner, 1995);
- w triasie dolnym i górnym (tylko sole kamienne – np. Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016),
- w środkowym miocenie – baden (tylko sole kamienne, wyróżniane jako formacja z Wieliczki – np. Garlicki, 1979; Czapowski, 1994; Bukowski, 2011).

Obecnie znaczenie ekonomiczne dla podziemnego magazynowania i składowania mają jedynie sole wieku permskiego, występujące na ponad połowie obszaru kraju oraz sole wieku mioceńskiego, skupione w południowej części

Tabela 23

Bilans pojemności składowania formacji wodonośnych w Polsce w rozbiciu na rejony (Wójcicki i in., 2013)

Formacja	Miocen	Kreda	Jura	Trias	Perm	Karbon górny	Karbon–dewon	Kambr	RAZEM
Liczba struktur	7	10	16 + 1	7	3	–	2	–	46
Pojemność [mln t]	69	2486	6452	1460	1014	193	176	2645	14 495

Tabela 24

Stratygrafia utworów solnych miocenu i permu na obszarze Polski (Garlicki, 1994; Wagner, 1995; zmienione i uzupełnione)

<table>
<tr><th rowspan="2">Epoka/wiek</th><th colspan="6">Jednostki litostratygraficzne</th></tr>
<tr><th colspan="5">wydzielenia solne</th><th colspan="2">wydzielenia cyklotemowe</th></tr>
<tr><td>Środkowy miocen (baden)</td><td colspan="7">formacja z Wieliczki</td></tr>
<tr><td rowspan="15">Perm (cechsztyn)</td><td colspan="2">formacja Piławy (FP)</td><td rowspan="7">zuber czerwony (Na4t)</td><td>PZ4c-e</td><td rowspan="7">PZ4</td></tr>
<tr><td>najmłodsza sól kamienna stropowa (Na4b2)</td><td>formacja Iny (FI)</td><td rowspan="2">PZ4b</td></tr>
<tr><td>sól rozdzielająca (Na4b1)</td><td rowspan="2">formacja Korytnicy (FK)</td></tr>
<tr><td>najmłodsza sól kamienna ilasta (Na4a2t)</td><td rowspan="4">PZ4a</td></tr>
<tr><td>najmłodsza sól kamienna górna (Na4a2)</td><td rowspan="3">formacja Parsęty (FP)</td></tr>
<tr><td>najmłodsza sól kamienna dolna (Na4a1)</td></tr>
<tr><td>sól podścielająca (Na4a0)</td></tr>
<tr><td>młodsza sól kamienna ilasta (Na3t)</td><td>formacja Gwdy (FG)</td><td>zuber brunatny (Na3t)</td><td colspan="2" rowspan="4">PZ3</td></tr>
<tr><td colspan="3">młodsza sól kamienna górna (Na3g)</td></tr>
<tr><td colspan="3">młodsza sól potasowa (K3)</td></tr>
<tr><td colspan="3">młodsza sól kamienna dolna (Na3d)</td></tr>
<tr><td colspan="3">starsza sól kamienna kryjąca (Na2r)</td><td colspan="2" rowspan="3">PZ2</td></tr>
<tr><td colspan="3">starsza sól potasowa (K2)</td></tr>
<tr><td colspan="3">starsza sól kamienna (Na2)</td></tr>
<tr><td colspan="3">najstarsza sól kamienna (Na1)</td><td colspan="2">PZ1</td></tr>
</table>

Polski na Górnym Śląsku i w obrębie zapadliska przedkarpackiego (rys. 22).

Podstawowym źródłem soli w Polsce jest obecnie cechsztyńska formacja solonośna, rozciągająca się na ponad połowie obszaru Polski, głównie na terenie Niżu Polskiego (rys. 22). Osady solne osiągają tu łączną miąższość ponad 1000 m. Pokładowe wystąpienia soli udokumentowano do głębokości 1 km w północnej (obszar w rejonie Zatoki Puckiej, np. złoża: Zatoka Pucka, Mechelinki, Łeba) oraz w południowo-zachodniej Polsce w strefie przedsudeckiej (np. złoże soli kamiennej Bądzów – rys. 22). W strefie o orientacji NW–SE, rozciągającej się od okolic Wolina po Bełchatów, utwory solne przykryte nadkładem grubości do 7 km, zostały lokalnie wypiętrzone i tworzą pas wysadowych struktur solnych o różnej wysokości. W szeregu najpłycej występujących struktur udokumentowano złoża soli kamiennej (np. Damasławek, Góra czy Kłodawa) i soli potasowo-magnezowych (np. Kłodawa).

Pokłady triasowej soli kamiennej występują w utworach triasu dolnego (miąższość >13 m) i górnego (miąższość 40–143 m) w zachodniej i środkowej Polsce na głębokości od 1,2 km do ponad 3 km. Rozpoznano je jedynie pojedynczymi otworami wiertniczymi, stąd też brak dotychczas oszacowania ich zasobów i ekonomicznej oceny ich wartości jako kopaliny (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016).

Udokumentowane złoża soli kamiennej i soli potasowo-magnezowej mają formę złóż: pokładowych (permskie sole w północnej Polsce i na obszarze przedsudeckim oraz mioceńskie sole kamienne na Górnym Śląsku), fałdowych (złoża soli kamiennej w zapadlisku przedkarpackim) i wysadowych (sole permskie strefy wysadów na Niżu Polskim). Pośrednią formę pomiędzy wystąpieniami pokładowymi a fałdowymi stanowią poduszki solne (rys. 16B).

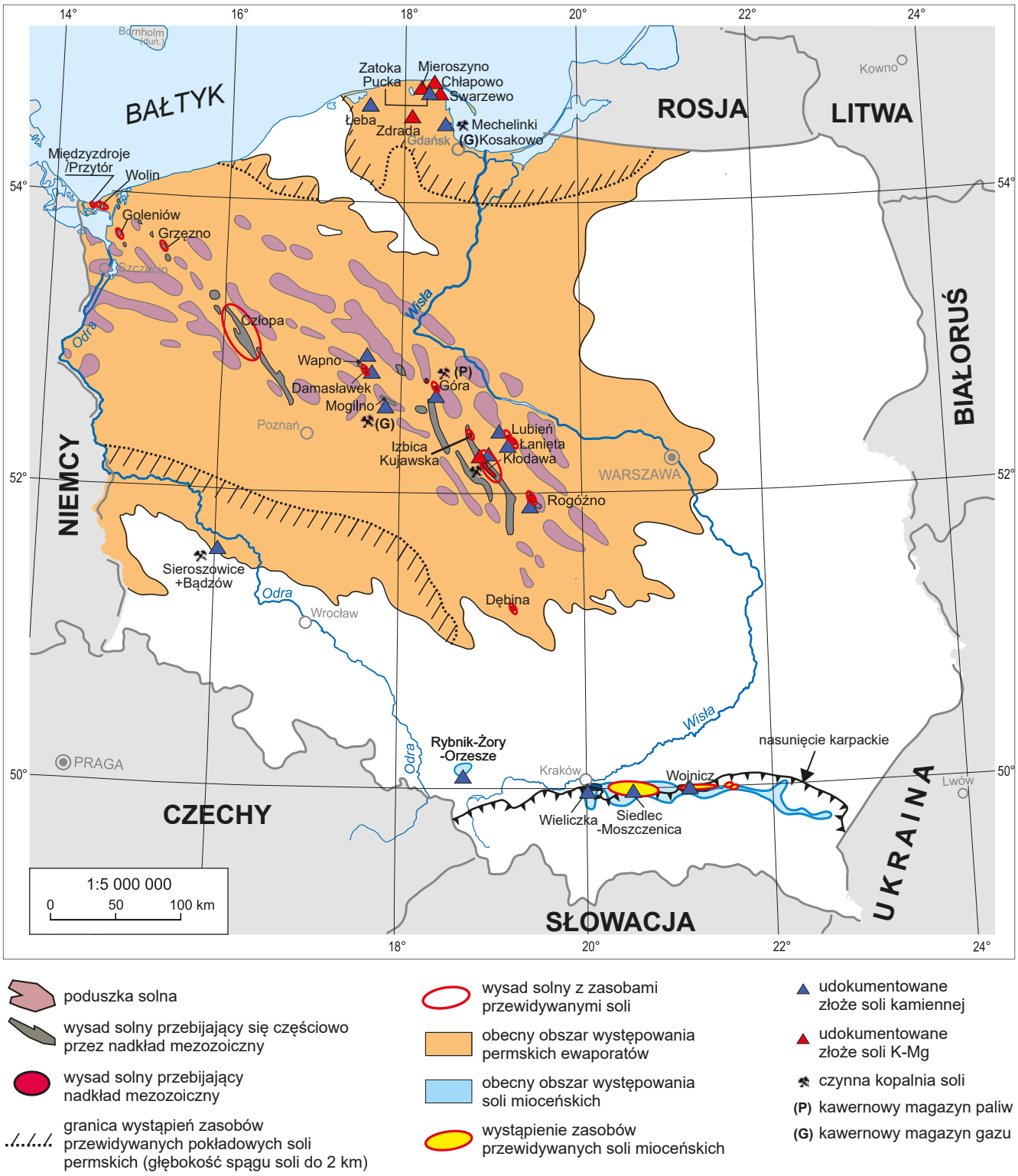
W Polsce udokumentowano dotychczas 19 złóż soli kamiennej (rys. 22; tab. 25), o łącznych zasobach geologicznych (bilansowych i pozabilansowych) ponad 122 mld Mg, z czego pięć złóż o zasobach blisko 9,8 mld Mg jest obecnie eksploatowanych. Dane te wskazują, że nie istnieje problem braku zasobów soli kamiennej w Polsce ani złóż możliwych do wykorzystania, zarówno w celu pozyskiwania soli, jak i budowy przestrzeni magazynowych czy składowiskowych.

W 10 nieeksploatowanych złożach (dobrze rozpoznanych) kryje się ponad 106 mld Mg udokumentowanych zasobów soli kamiennej, więc istnieje ponad 7-krotnie większa – w stosunku do zasobów udokumentowanych – rezerwa zasobów soli, możliwa do zagospodarowania bez konieczności wykonania dodatkowego rozpoznania i dokumentowania tych złóż. Niewielka – blisko 0,4 mld Mg – rezerwa zasobów soli istnieje nadal w złożach, gdzie zaniechano już eksploatacji (złoża soli mioceńskich Siedlec–Moszczenica i Wieliczka oraz wysadowe złoże soli permskich Wapno – Szuflicki i in., 2022).

Większość (94,9%) udokumentowanych zasobów dotyczy złóż soli permskich, w tym zasoby bilansowe pięciu złóż pokładowych wynoszą ok. 26,14 mld Mg (ok. 23,3% krajowych zasobów soli), a dziewięciu złóż typu wysadowego –

ponad 81 mld Mg (blisko 73% zasobów krajowych). Z tych złóż pochodzi całe krajowe wydobycie soli kamiennej, które w 2021 r. wyniosło >5,36 mln Mg (Szuflicki i in., 2022). Z kolei udokumentowane zasoby bilansowe czterech złóż soli mioceńskich wynoszą >4,36 mld Mg, co stanowi jedynie ok. 3,9% krajowych zasobów soli kamiennej. Złoża te nie są obecnie eksploatowane.

Obecnie wydobycie soli kamiennej jest prowadzone w dwóch kopalniach podziemnych (Kłodawa i Sieroszowice) oraz w trzech kopalniach otworowych (Góra, Mogilno i Kosakowo – rys. 22). W złożu Mogilno II w wyługowanych kawernach solnych funkcjonuje magazyn gazu, a część kawern poeksploatacyjnych w złożu Góra zaadaptowano do magazynowania paliw (rys. 22). Ponadto w złożu Mechelinki



poduszka solna

wysad solny przebijający się częściowo przez nadkład mezozoiczny

wysad solny przebijający nadkład mezozoiczny

granica wystąpień zasobów przewidywanych pokładowych soli permskich (głębokość spągu soli do 2 km)

wysad solny z zasobami przewidywanymi soli

obecny obszar występowania permskich ewaporatów

obecny obszar występowania soli mioceńskich

wystąpienie zasobów przewidywanych soli mioceńskich

udokumentowane złoże soli kamiennej

udokumentowane złoże soli K-Mg

czynna kopalnia soli

(P) kawernowy magazyn paliw

(G) kawernowy magazyn gazu

Rys. 22. Występowania utworów, struktur i złóż solnych w Polsce oraz lokalizacja kawernowych magazynów gazu i paliw (Nawrocki, Becker, 2017; zmienione)

od 2014 r. funkcjonuje podziemny kawernowy magazyn gazu Kosakowo (rys. 22 i 23).

W Polsce udokumentowano pięć złóż permskich soli potasowo-magnezowych (rys. 22) o zasobach geologicznych w ilości 705 mln Mg (tab. 25). Złoża te, tworzące wystąpienia pokładowe (4 złoża) i wysadowe (1 złoże), nie są obecnie eksploatowane.

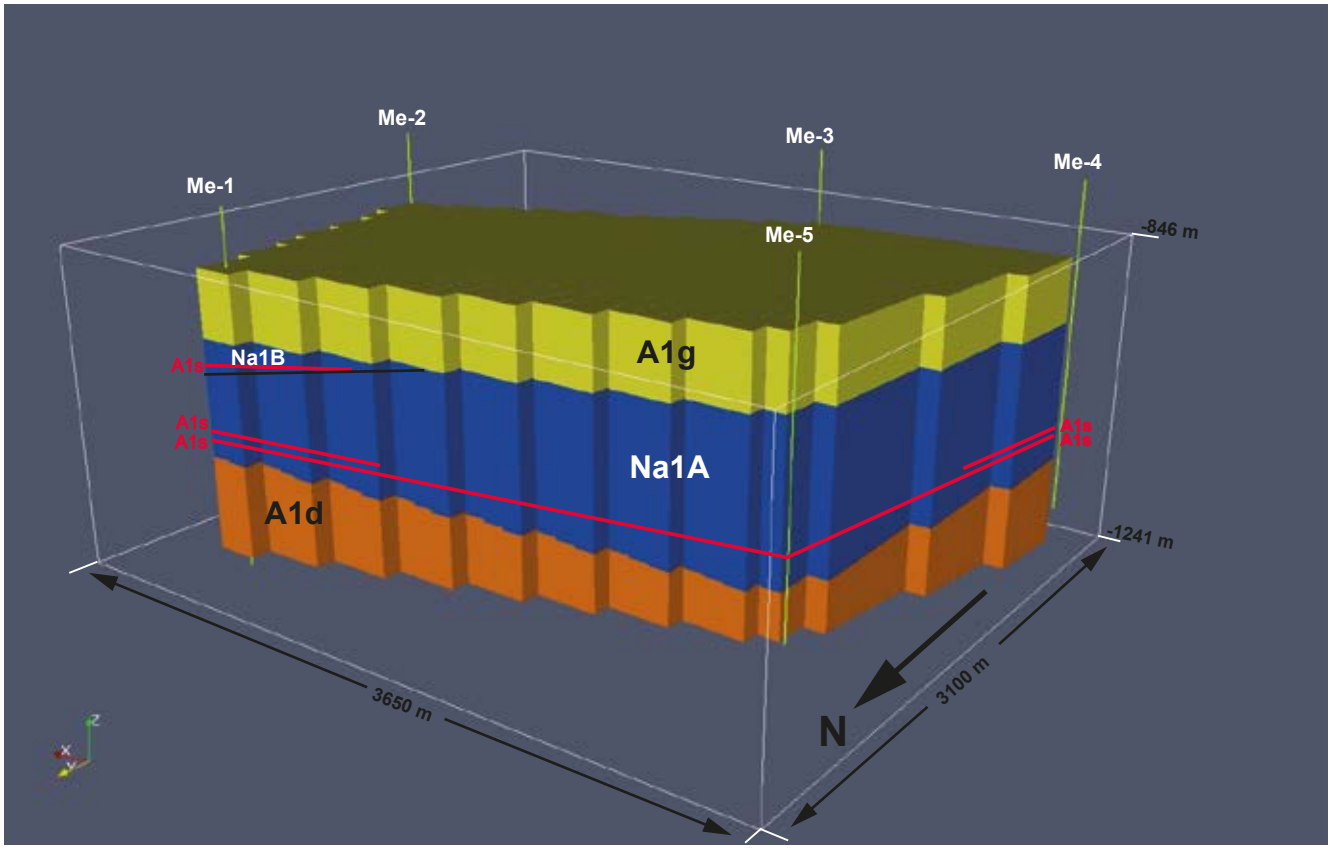
Oprócz zasobów udokumentowanych złóż soli kamiennej, na obszarach wystąpień obu formacji solonośnych oszacowano w latach 2008–2015 do głębokości 2 km ogromne zasoby określone jako przewidywane (Wołkowicz i in., 2011; Czapowski, Bukowski, 2013, 2016; Czapowski i in., 2015, 2020; Mikulski i in., 2015, 2016; Czapowski, 2017).

Zasoby przewidywane soli kamiennej oszacowano w przypadku soli permskich w obrębie wysadów solnych na blisko 140 mld Mg, a w wystąpieniach pokładowych na terenie północnej i wschodniej Polski – na ponad 2871 mld Mg. Z kolei na obszarze przedsudeckim zasoby te oceniono na

Tabela 25

Zestawienie udokumentowanych zasobów soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych w Polsce wg stanu na 31.12.2020 (Szuflicki i in., 2022; zmienione)

Liczba złóż eksploatowanych	Liczba złóż rozpoznanych, nieeksploatowanych	Liczba złóż o zaniechanej eksploatacji	Zasoby geologiczne
sól kamienna			**[mld Mg]**
5	–	–	9,785
–	10	–	106,953
–	–	4	6,069
Liczba złóż łącznie	19	Zasoby łącznie	122,807
sole potasowo-magnezowe			**[mln Mg]**
–	5	–	705,00



Rys. 23. Model 3D budowy geologicznej pokładowego złoża permskiej soli kamiennej Mechelinki (Czapowski i in., 2007)

A1d – utwory siarczanowe wydzielenia anhydrytu dolnego, A1g – utwory siarczanowe wydzielenia anhydrytu górnego, A1s – utwory siarczanowe wydzielenia anhydrytu śródsolnego, Na1 – utwory soli kamiennej wydzielenia najstarszej soli kamiennej, podzielonej na części dolną (A) i górną (B), Me-1 – otwór wiertniczy

blisko 1041 mld Mg (rys. 22, tab. 26). Łączne zasoby tych soli wynoszą ponad 4052 mld Mg, a szacowana powierzchnia zajętego przez nie obszaru to ponad 31,5 tys. km^2.

Z kolei zasoby przewidywane mioceńskiej soli kamiennej, ulokowane w obrębie zapadliska przedkarpackiego (rys. 22), oszacowano na blisko 6,9 mld Mg, a ich powierzchnia wynosi ponad 137 km^2 (tab. 26).

Łączne zasoby przewidywane soli kamiennej w Polsce oszacowano na blisko 4,059 bln Mg, w tym zasoby soli mioceńskich stanowią jedynie drobny ułamek (0,17%) całości tych zasobów. Powierzchnia zasobów przewidywanych soli mioceńskich stanowi jedynie 0,4% całkowitej powierzchni wystąpień tych zasobów w Polsce (ponad 31,7 tys. km^2 – tab. 26).

Zasoby soli kamiennej w Polsce – udokumentowane i przewidywane – należy uznać za największe, w znaczeniu wystarczalności zasobów, spośród wszystkich polskich kopalin. Dostępne do eksploatacji stosowanymi obecnie metodami górniczymi zasoby (udokumentowane i przewidywane) soli kamiennej w Polsce wynoszą ok. 4,18 bln Mg, w tym zasoby udokumentowane to ponad 122 mld Mg, a przewidywane – blisko 4,059 bln Mg.

Przyjmując średnie roczne krajowe wydobycie soli rzędu 4 mln Mg i przykładowe wykorzystanie jedynie 10% kopaliny w złożu, to dotychczas udokumentowane zasoby soli kamiennej (> 122 mld Mg) w Polsce zaspokajają zapotrzebowanie na ten surowiec na ponad 3 tys. lat. Ponadto w przypadku złóż niegdyś udokumentowanych, a dotychczas niezagospodarowanych, nastąpił znaczny wzrost ich zasobów w wyniku aktualizacji dokumentacji – np. złoże Lubień (Orska, 1979; Pisiewicz, 2018) czy Damasławek (Kornowska, 1983; Pisiewicz, 2020).

Istotny problem w zagospodarowaniu złóż soli, zarówno jeżeli chodzi o budowę kopalni podziemnej, jak i ługowanie górotworu otworami wiertniczymi z powierzchni, stanowi ich budowa geologiczna. Stopień jej komplikacji zależy od skali zaangażowania tektonicznego górotworu oraz liczebności tworzących go wydzieleń solnych i niesolnych. Szczególnie liczne odrębne wydzielenia skał solnych występują w obrębie cechsztyńskiej formacji solonośnej, w której wyróżniono cztery cyklotemy ewaporatowe (tab. 24).

Stosunkowo prosta budowa cechuje złoża pokładowe (np. złoże soli Mechelinki – rys. 23), w których skały solne (sole kamienne i potasowo-magnezowe) i niesolne (np. siarczany czy węglany) tworzą poziome lub nachylone pokłady o miąższości zmieniającej się wzdłuż ich rozciągłości. Mogą komplikować tę prostą sukcesję skalną np. przewarstwienia skał niesolnych czy soli potasowo-magnezowych o zmiennej grubości i rozprzestrzenieniu w obrębie pokładu soli kamiennej. Liczne uskoki, przemieszczające całe pakiety skalne, wpływają na formę złoża, czego przykładem jest np. pokładowe złoże soli mioceńskich Rybnik–Żory–Orzesze, w znacznej części ulokowane w rowie tektonicznym (Czapowski, Bukowski, 2009). Wykształcenie i parametry chemiczne oraz fizyczno-mechaniczne soli w tej formie złoża są względnie stałe lub zmieniają się w niewielkim stopniu w profilu poziomym i pionowym pokładu. Dzięki temu dobre rozpoznanie sejsmiczne o wysokiej rozdzielczości, powiązane z informacjami z profilów otworów wiertniczych, umożliwia w sposób planowy lokowanie wyrobisk górniczych w takim typie złoża.

Wysoka mobilność soli – kamiennej i potasowo-magnezowej – pod wpływem naprężeń przez obciążenie nadkładem, sprzyja jej przemieszczeniu i zmianie miąższości pokładów solnych. Mogą powstawać wówczas poduszki solne (rys. 16B). Warstwy skał niesolnych (węglanów, siarczanów czy klastyków), występujące w obrębie zdeformowanego pokładu soli, uginają się współkształtnie do granic pokładu lub ulegają częściowemu rozerwaniu i przemieszczeniu w obrębie pokładu. W przypadku poduszek solnych skala zaburzeń jest różna, w niektórych deformacje serii solnych obejmują tylko najniższą część pierwotnej sukcesji pakietów soli i skał niesolnych, w innych zaangażowane są też młodsze warstwy.

Tabela 26

Zasoby przewidywane soli kamiennej w Polsce (wg Czapowski i in., 2020)

Rejon	Zasoby przewidywane	
	powierzchnia [km^2]	zasoby [mln Mg]
PERMSKA SÓL KAMIENNA		
wysady solne		
Północno-zachodnia i centralna (Niż Polski) Polska	406,87	139 945,79
wystąpienia pokładowe		
Północna i wschodnia Polska	12 652,62	2 871 221,71
Południowo-zachodnia Polska	18 512,79	1 040 895,01
Zasoby permskiej soli kamiennej ogółem	**31 572,28**	**4 052 062,51**
MIOCEŃSKA SÓL KAMIENNA		
Zapadlisko przedkarpackie	137,13	6 897,29
	Zasoby przewidywane soli kamiennej ogółem	
	31 709,41	**4 058 959,80**

W obrębie poduszek następują też wyraźne zmiany miąższości poszczególnych warstw i lokalnie część z nich może ulec wyklinowaniu. Konsekwencją takiej budowy wewnętrznej jest istotna zmiana parametrów fizyczno-mechanicznych soli w profilu poziomym i pionowym poduszki. Poznanie tej budowy jest znacznie trudniejsze niż w przypadku złóż pokładowych. Najbardziej wiarygodnych danych dostarczają otwory wiertnicze. Głębokie (>3 km) występowanie poduszek solnych w utworach permu na Niżu Polskim (rys. 22) skutkuje stosunkowo słabym ich rozpoznaniem otworami wiertniczymi. Lokalizację i kontury poduszek uzyskano dzięki profilom sejsmicznym i badaniom grawimetrycznym.

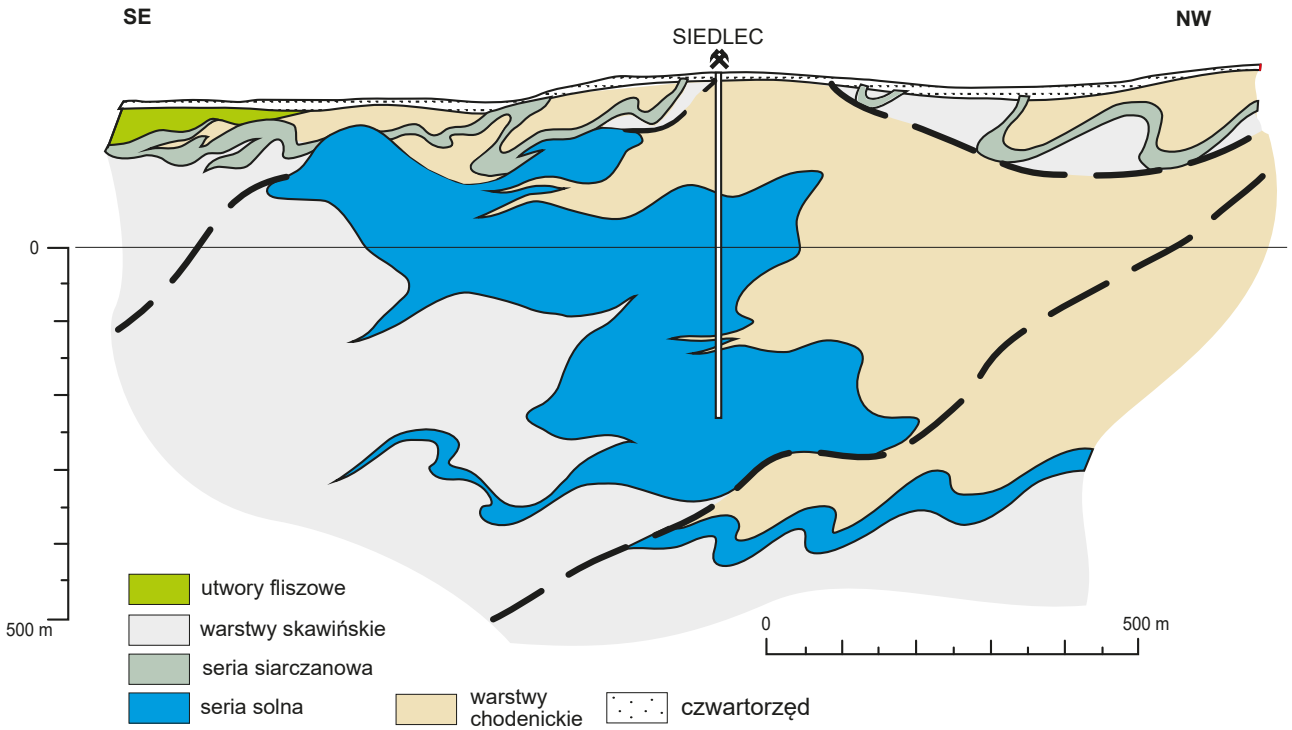
Większy stopień deformacji halokinetycznych serii solnych i powiązanych z nimi utworów niesolnych reprezentują złoża typu fałdowego, jak np. złoże soli Siedlec (rys. 24). Złoża te budują sole kamienne miocenu w obrębie zapadliska przedkarpackiego, warstwy soli są silnie, plastycznie zdeformowane i miejscami wciśnięte w utwory nadkładu, a także przemieszczone wzdłuż dyslokacji. Przewarstwiające skały niesolne – głównie siarczany i klastyki – są często rozerwane i wielokrotnie przefałdowane. Miąższość, wykształcenie i parametry fizyczno-mechaniczne oraz chemiczne soli w profilu poziomym i pionowym takich złóż są bardzo zmienne, a poznanie budowy wewnętrznej tych struktur jest możliwe jedynie przez wykonanie otworów wiertniczych.

Największy stopień deformacji serii solnych i powiązanych z nimi utworów niesolnych obserwuje się w złożach typu wysadowego, gdzie są one wielokrotnie przefałdowane, często porozrywane i wyklinowane, ich miąższość zmienia się bardzo szybko w obrębie wysadu. Skały te tworzą tzw. pień solny wysadu, którego wysokość może sięgać kilku kilometrów. Pień ten przebija się przez utwory nadkładu częściowo, np. wysad Goleniów (rys. 25) i Kłodawa (rys. 26), w skrajnych przypadkach dociera niemal do powierzchni terenu, np. wysady Inowrocław i Wapno (rys. 22).

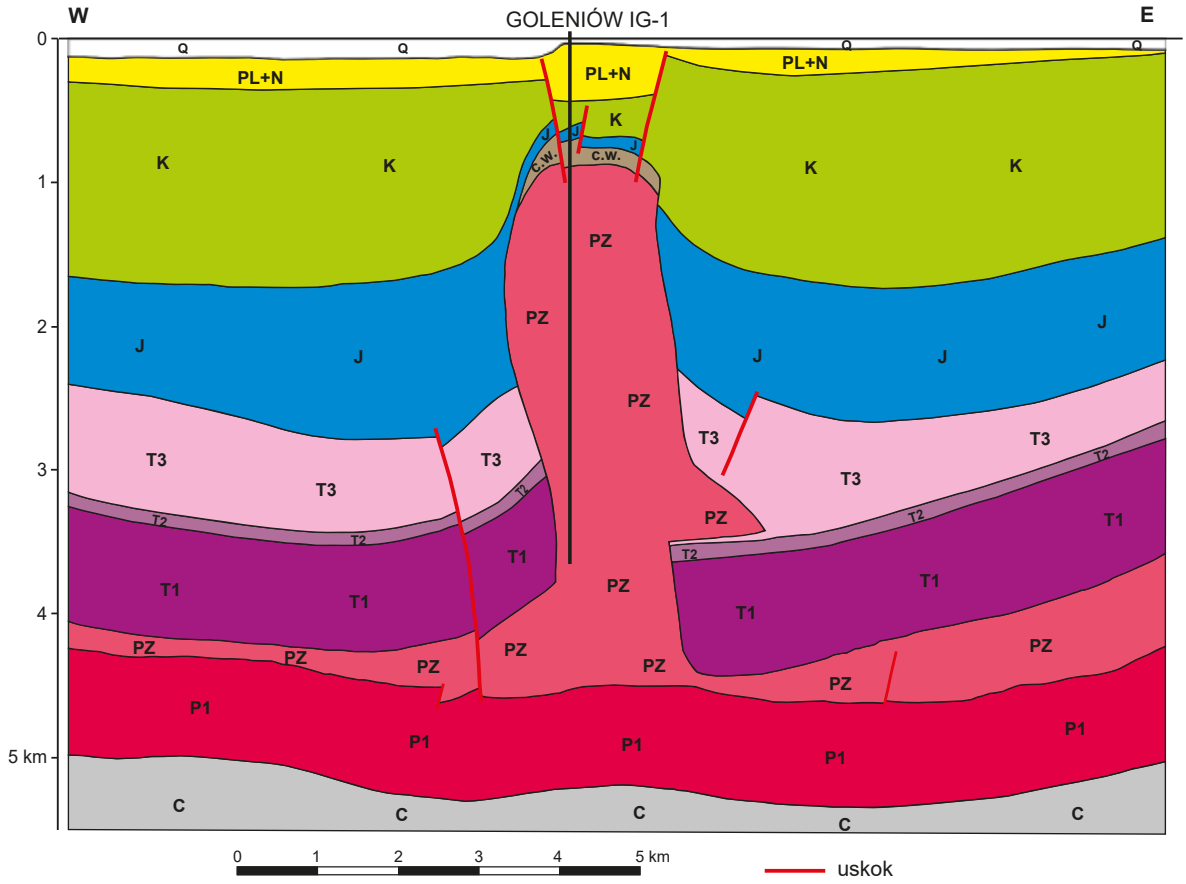
Budowa wewnętrzna wysadów solnych jest wyjątkowo skomplikowana, występują w nich wielokrotne powtórzenia pierwotnych sukcesji skał solnych (soli kamiennej i potasowo-magnezowych oraz soli ilastych i zubrów) i niesolnych (klastyki, węglany i siarczany), którym towarzyszą dyslokacje i wyklinowania warstw (rys. 26). W konsekwencji miąższość, wykształcenie i parametry fizyczno-mechaniczne oraz chemiczne soli w profilu poziomym i pionowym wysadu są bardzo zmienne, a poznanie budowy wewnętrznej jest możliwe jedynie poprzez otwory wiertnicze i wyrobiska podziemne. Profile sejsmiczne i grawimetryczne pozwalają jedynie określić kształt i rozmiary wysadu. Budowę wewnętrzną próbuje się rozpoznać bazując na ostatnio stosowanych prześwietleniach radarowych, wykonywanych z odwiertów (np. Tadych i in., 2014) lub z podziemnych wyrobisk górniczych (np. Chrul i in., 2017). Rejestrują one refleksy od warstw skalnych o wysokim stopniu odbicia (siarczany, węglany), lecz mają stosunkowo niewielki zasięg.

Występujące w Polsce mioceńskie sole kamienne (formacja z Wieliczki) nie zawierają przewarstwień soli potasowo-magnezowych, ale występują w nich liczne wkładki siarczanów i skał klastycznych (np. Garlicki, 1979; Bukowski, 2011), co utrudnia ługowanie kawern.

W Polsce sole kamienne cechsztynu są głównym obiektem lokalizacji magazynów. Według stanu na 2021 r. funkcjonują wykonane w nich dwa kawernowe magazyny gazu: w złożu Mogilno II w wysadzie solnym Mogilno (PKMG Mogilno – Gąska i in., 2012) oraz w pokładowym złożu soli kamiennej Mechelinki (PMG Kosakowo – Gąska, 2000; Gąska i in., 2012,

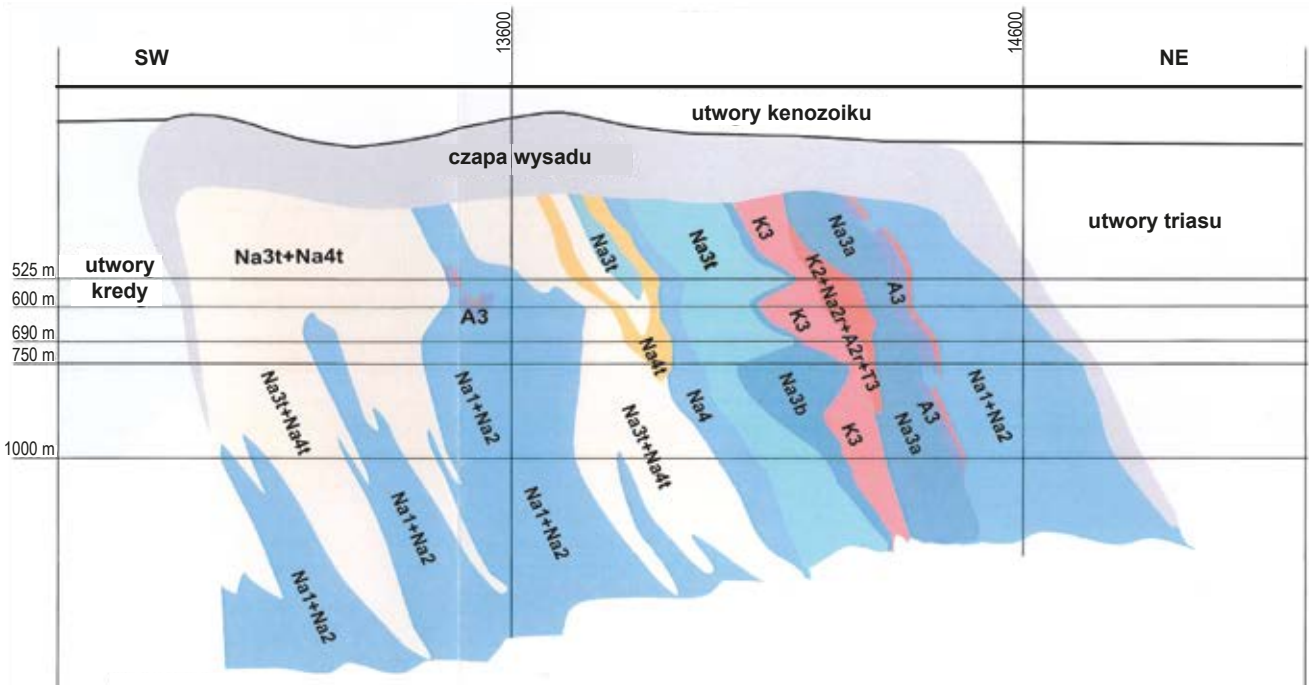


Rys. 24. Przekrój geologiczny przez fałdowe złoże mioceńskiej soli kamiennej Siedlec (Czapowski i in., 2020)



Rys. 25. Przekrój geologiczny przez wysad solny Goleniów (Czapowski, Tarkowski, 2018)

C – karbon, P1 – czerwony spągowiec, PZ – cechsztyn, T1 – trias dolny, T2 – trias środkowy, T3 – trias górny, J – jura, K – kreda, PL+N – paleogen i neogen, Q – czwartorzęd; Goleniów IG-1 – otwór wiertniczy



Rys. 26. Przekrój geologiczny przez wysadowe złoże permskiej soli kamiennej Kłodawa (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2018)

Wydzielenia litostratygraficzne cechsztynu: Na4t – zuber czerwony, Na4 – najmłodsza sól kamienna, Na3t – zuber brunatny, Na3b – młodsza sól kamienna górna, K3 – młodsza sól potasowa, Na3a – młodsza sól kamienna dolna, A3 – anhydryt główny, T3 + Ca3 – szary ił solny + dolomit płytowy, Na2r – starsza sól kamienna kryjąca, A2r – anhydryt kryjący, K2 – starsza sól potasowa, Na2 – starsza sól kamienna, A2 – anhydryt podstawowy, Ca2 – dolomit główny, T2 – łupek cuchnący, A1g – anhydryt górny, Na1 – najstarsza sól kamienna; p.k. – poziom kopalniany

Laskowska i in., 2009). Część wyługowanych kawern eksploatacyjnych w wysadzie solnym Góra została zaadaptowana na magazyny paliw i ropy naftowej (Podziemny Magazyn Ropy i Paliw Płynnych [PMRiP] Góra – np. Drogowski, Tadych, 2006; Kunstman i in., 2002). Sole mioceńskie nie zostały dotychczas wykorzystane pod tym kątem.

W Polsce w ostatnim 30-leciu prowadzono też liczne prace studialne nad możliwością składowania w utworach solnych odpadów stałych (np. Radomski, 1994; Garlicki, 1997; Kłeczek, Zeljaś, 2004; Ślizowski K. i in., 2004; Dębkowski i in., 2010; Andrusikiewicz i in., 2019; Plucińska i in., 2019) oraz gazów (np. dwutlenku węgla – Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2003; Tarkowski, 2005; Poborska-Młynarska, 2008).

6.1.4. Wyrobiska kopalń podziemnych

W Polsce nie istnieje obecnie żaden obiekt zlokalizowany w podziemnych wyrobiskach górniczych dawnych kopalń.

W kraju funkcjonuje 36 zakładów górniczych (stan na 31.12.2021 r. – www.wug.gov.pl), w tym:

- 20 kopalń wydobywających węgiel kamienny, prowadzące działalność w 30 ruchach + 8 kopalń w likwidacji (w strukturach SRK SA) + 1 w budowie;
- 3 kopalnie rudy miedzi: KGHM Polska Miedź SA O/ZG Lubin; KGHM Polska Miedź SA O/ZG Rudna, KGHM Polska Miedź SA O/ZG Polkowice-Sieroszowice;
- 1 kopalnia rudy cynku i ołowiu w likwidacji: Olkusz-Pomorzany;
- 1 kopalnia soli: KS Kłodawa,
- 1 kopalnia gipsu i anhydrytu: Kopalnia Gipsu i Anhydrytu „NOWY LĄD" Sp. zo.o.;
- 1 inna kopalnia: UZG Wieliczka (wydobycie solanki do celów leczniczych, koncesja marszałka województwa).

Są również 22 podmioty, które uzyskały inne niż koncesje decyzje stanowiące podstawę działalności regulowanej ustawą pgg, obejmujące zadania takie jak:

- budowa, rozbudowa oraz utrzymanie systemów odwadniania zlikwidowanych zakładów górniczych (art. 2 ust. 1 pkt. 1. pgg);
- roboty prowadzone w wyrobiskach zlikwidowanych podziemnych zakładów górniczych, w szczególności turystycznych, leczniczych i rekreacyjnych (art. 2 ust. 1 pkt 2. pgg);
- roboty podziemne prowadzone w celach naukowych, badawczych, doświadczalnych i szkoleniowych na potrzeby geologii i górnictwa (art. 2 ust. 1 pkt. 3. pgg);
- drążenia tuneli z zastosowaniem techniki górniczej (art. 2 ust. 1 pkt. 4. pgg).

Są to np. zakłady utrzymujące system odwadniania zlikwidowanego zakładu górniczego, kopalnie zabytkowe i sztolnie (np. soli, węgla, złota, ołowiu i srebra, uranu itp.), podziemne trasy turystyczne, szyby badawcze itp.

Część z 22 podmiotów, które uzyskały inne niż koncesje decyzje stanowiące podstawę działalności regulowanej ustawą pgg, można wyeliminować z grupy rozpatrywanych pod kątem potencjalnej możliwości podziemnego składowania lub magazynowania w związku z przeznaczeniem na inne cele. Są to obiekty związane z drążeniem tuneli, odwadnianiem (z uwagi na warunki wodne) oraz związane z prowadzeniem działalności naukowej. Podobne podejście można przyjąć w przypadku reaktywacji starych wyrobisk na cele turystyczne. Nieco inaczej należy postrzegać przypadek kopalń soli Wieliczka i Bochnia. Stosując analogiczne podejście jak dla wykorzystania środków zgromadzonych w ramach funduszu likwidacji zakładu górniczego (FLZG), teoretycznie możliwe jest utworzenie wyodrębnionych części likwidowanego zakładu w niektórych wytypowanych partiach tych kopalń na cele składowania odpadów. Wątpliwe jest jednak, czy kopalnia w Wieliczce, mająca 1,5 mln/rok gości z całego świata i będąca na liście UNESCO, zgodziłaby się na takie rozwiązanie. Podobnie zresztą jak aspirująca do tej rangi i konkurująca w turystyce kopalnia w Bochni, która zlikwidowała w XXI w. inne, podległe jej pola wydobywcze (Łężkowice).

Niemniej warto zauważyć, że dla kilku spośród obiektów turystycznych ujętych w katalogu zakładów górniczych (inwentaryzacja podziemnych zakładów górniczych w Polsce wg stanu na 31.12.2021 – www.wug.gov.pl), dla których okazałoby się w przyszłości, że wpływy z turystyki nie są wystarczające do utrzymania takiego obiektu, mogą pojawić się spekulacje co do możliwości zmiany funkcji obiektu na składowanie odpadów. Jakkolwiek teoretycznie nie można tego wykluczyć, to jednak zdecydowanie łatwiej jest czynnemu zakładowi górniczemu, mającemu koncesję na wydobywanie kopaliny, dokonać zmiany tej koncesji i proces likwidacji zakładu górniczego powiązać ze składowaniem odpadów, niż przeprowadzić cały proces formalnoprawny (w tym zwłaszcza planowanie przestrzenne, decyzja środowiskowa, koncesja) dla niewielkiego obiektu, do niedawna turystycznego. Z tych powodów w dalszej analizie spekulacje te nie były rozpatrywane.

Z kolei dla 36 zakładów górniczych należałoby zrobić odrębne analizy, z wyłączeniem kopalni w budowie (Heddi II), UZG Wieliczka oraz silnie zawodnionej, likwidowanej kopalni Olkusz-Pomorzany, gdyż nie mogą być rozpatrywane pod kątem składowania odpadów, zwłaszcza niebezpiecznych. Analiza taka została przeprowadzona już w 2004 r. (Ślizowski K. i in., 2004), jednak ze względu na upływ prawie 20 lat wymaga pewnej aktualizacji, zwłaszcza w zakresie listy (katalogu) rozpatrywanych zakładów górniczych (kopalń) oraz w związku ze zmianą przepisów.

Niemniej w odniesieniu do wszystkich kopalń węgla kamiennego zlokalizowanych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), w zasadzie prawdziwe pozostaje stwierdzenie: *Intensywne zagospodarowanie górnicze GZW sprawiło, że większość sąsiadujących ze sobą kopalń łączy się zarówno wyrobiskami górniczymi, jak i niekontrolowanymi drogami możliwego przepływu wody. Dotyczy to w szczególności kopalń usytuowanych w rejonie siodła głównego i niecki bytomskiej, gdzie obok licznych połączeń wyrobiskami górniczymi występują kontaktujące się ze sobą strefy zawałowe, strefy uskokowe, naruszone lub zniszczone filary graniczne, stanowiące niekontrolowane połączenia hydrauliczne* (Ślizowski K. i in., 2004).

W konkluzji autorzy (Ślizowski K. i in., 2004) stwierdzają, odnosząc się zarówno do Górnośląskiego, Dolnośląskiego

(aktualnie – w 2022 r. całkowicie zatopione), jak i Lubelskiego Zagłębia Węglowego, że: *Wyrobiska kopalń węgla kamiennego, nie spełniające wymaganych kryteriów bezpieczeństwa, nie mogą być wykorzystywane do składowania niebezpiecznych odpadów.*

Dopuszcza się jednak przeznaczenie niektórych części zakładów górniczych wydobywających węgiel kamienny na podziemny magazyn gazu (kopalnie Silesia i Krupiński), rozpatrując nawet aspekty ekonomiczne takiego przedsięwzięcia (Siemek, Nagy, 2007). W takim przypadku w szczególności odrzucenie KWK Silesia, która jest odizolowana od innych kopalń GZW (Ślizowski K. i in., 2004), wymagałoby indywidualnej oceny pod kątem ewentualnego projektu, gdyby taki był rozpatrywany.

W odniesieniu do wyrobisk zakładów górniczych należących do KGHM SA dyskwalifikują je (Ślizowski K. i in., 2004):

- brak odpowiednich wyrobisk poeksploatacyjnych (kierowanie stropem);
- stan zagrożenia wodnego;
- warunki hydrogeologiczne górotworu;
- deformacje w górotworze wywołane eksploatacją.

Jedynie rozpatrując wyżej zalegający pokład soli kamiennej uznano, że w najbardziej miąższych strefach pokładu solnego, poza zasięgiem wpływów eksploatacji rud miedzi (Sieroszowice), możliwe jest rozpatrywanie w nim budowy składowiska odpadów (Ślizowski K. i in., 2004).

Zdyskwalifikowano także kopalnię anhydrytu Nowy Ląd, ze względu na: *płytkie położenie komór eksploatacyjnych w kopalni, duże zagrożenie wodne w okresie jej działalności i całkowite jej zatopienie po wyczerpaniu złoża* (Ślizowski K. i in., 2004).

Tak więc jedynym spośród podziemnych zakładów górniczych potencjalnie możliwym do wytypowania na podziemne składowisko odpadów pozostaje zakład górniczy KS Kłodawa, należący do KS Kłodawa SA, zlokalizowany w centralnej Polsce na wysadowym złożu soli kamiennej Kłodawa 1. Aktualnie kopalnia ta prowadzi czynności zmierzające do wypełniania pustek poeksploatacyjnych za pomocą mieszanek (past) bazujących na solance i pyłach pochodzących z instalacji termicznego przekształcania odpadów. Lokalizacja podziemnego składowiska odpadów w wydzielonej likwidowanej części zakładu górniczego może być następnym etapem.

Koncepcja technologii odzysku odpadów w kopalni soli (Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016; Korzeniowski i in., 2016) może polegać na szczelnym wypełnieniu wyeksploatowanych wyrobisk zestalającą się podsadzką pastową sporządzoną na bazie drobnoziarnistych odpadów stałych pochodzących ze spalarń odpadów komunalnych. Interesujące mogą być dwie technologie: technologia mieszaniny w formie pasty przygotowywanej na powierzchni i dostarczanej poprzez szyb do wyrobisk kopalni rurociągiem oraz technologia suchego odpadu, w której odpady z powierzchni transportowane są pneumatycznie rurociągiem do komór, gdzie znajduje się instalacja do przygotowania pasty, którą następnie rozprowadza się do wypełnianych wyrobisk. O możliwości wykorzystania wyrobisk poeksploatacyjnych w złożu solnym, jako składowiska odpadów, decyduje wiele czynników geologicznych i technicznych takich jak: położenie kopalni, budowa geologiczna złoża i jego otoczenia, warunki hydrogeologiczne i geologiczno-górnicze (struktura kopalni, rodzaje wyrobisk, stosowane systemy eksploatacji). Wskazane warunki mogą być spełnione np. w KS Kłodawa, będącym największym producentem soli zlokalizowanym w środkowej Polsce.

Kopalnia założona jest w wysadzie solnym, zbudowanym ze skał górnopermskiej formacji solonośnej. Złoże jest udostępnione trzema szybami. Kopalnia ma trzy poziomy główne na głębokościach ok.: 450, 600 i 750 m. W granicach obszaru górniczego wydzielono kilka pól eksploatacyjnych, które zostały podzielone na międzypoziomy. Podstawowym obecnie systemem eksploatacji jest tzw. system komór niskich. Sól wybierana jest prostopadłościennymi komorami o wymiarach zmieniających się wraz z głębokością eksploatacji i budową geologiczną złoża: szerokość 15–12 m, wysokość 15–13 m, długość 100–150 m. Komory są stateczne, chociaż podlegają powolnym, postępującym deformacjom. Po wybraniu złoża pozostają podziemne puste przestrzenie o olbrzymich objętościach. Strukturę przestrzenną kopalni stanowi sieć ok. 350 km chodników i 1000 komór o łącznej objętości 20 239 148 m^3 (stan na koniec 2021 r.; Mazurek, 2022).

W związku z istniejącymi planami kontynuacji eksploatacji soli i rozwoju kopalni w kolejnych latach, jedynie niektóre części pól eksploatacyjnych można przeznaczyć do składowania i odzysku odpadów, po niezbędnych rozstrzygnięciach formalnoprawnych w zakresie gospodarki odpadami, ochrony środowiska i być może w niektórych sytuacjach koniecznością zmian na poziomie ustawy lub rozporządzenia. Obecnie wskazać można dwa rejony kopalni o łącznej nominalnej pojemności wyrobisk przekraczającej 3 mln m^3.

Składowanie suchych odpadów w opakowaniach jest technologią sprawdzoną w kopalniach Europy Zachodniej, opanowaną technicznie, niewymagającą specjalnych instalacji. Nadaje się ona zarówno do odpadów masowych, odbieranych w dużych ilościach, jak i w ilościach niewielkich. Może być stosowana w komorach i wyrobiskach korytarzowych. Do technologii tej najkorzystniejszą postacią odpadów są drobnofrakcyjne odpady suche, opakowane np. w workach big-bag. Ujemnymi stronami tej technologii, podnoszącymi koszty składowania, są: stosowanie opakowań, które pozostają w składowisku oraz ograniczenia wynikające z przepustowości szybu i wyrobisk kopalnianych. Schemat składowania odpadów w opakowaniach z doszczelnianiem solą rozdrobnioną pokazano na rysunku 27A. Odzysk odpadów w postaci samozestalającej się pasty jest również sprawdzoną technologią, stosowaną nie tylko w podziemnych zakładach odzysku odpadów w Niemczech, lecz również znaną w górnictwie jako technologia podsadzki pastowej. Uproszczony schemat ideowy technologii przedstawiono na rysunku 27B.

Technologia ta polega na sporządzeniu mieszaniny, w której skład wchodzą drobnofrakcyjne odpady, materiał wiążący i woda (w kopalniach soli – solanka), oraz na transporcie mieszaniny rurociągiem do wyrobiska górniczego w kopalni. W docelowym wyrobisku mieszanina podlega zestaleniu z całkowitym związaniem cieczy, tworząc zwięzły masyw

o wytrzymałości na ściskanie rzędu kilku do kilkunastu MPa. Biorąc pod uwagę strukturę wyrobisk w KS Kłodawa, odzysk odpadów w technologii podsadzki pastowej można realizować na kilka sposobów:

– pneumatyczny transport rurociągiem suchych odpadów drobnofrakcyjnych z powierzchni do komory w wybranym rejonie kopalni;
– przygotowanie mieszaniny w instalacji w komorze;
– hydrauliczny transport rurociągiem bezpośrednio do wypełnianych komór;
– transport w workach big-bag (ewentualnie z uprzednim zagęszczeniem wibracyjnym).

Na rysunku 28 pokazano fotografię części rzeczywistej instalacji zainstalowana w jednej z kopalń. Wymaganą objętość wyrobisk przeznaczoną do składowania odpadów pochodzących z termicznego przekształcania odpadów komunalnych można oszacować przyjmując następujące przybliżone wartości:

– moc przerobowa składowiska: 100 000 Mg/rok (wielkość porównawcza);
– średnia gęstość objętościową odpadów: 1 Mg/m^3;
– okres przyjmowania odpadów: 1 rok;
– objętościowy współczynnik wypełnienia wyrobisk odpadami: 0,75 (Korzeniowski i in., 2015b);
– średnia objętość komory: 22 500 m^3 (15 × 15 × 100 m).

Szacunkowe obliczenia pokazują, że przy założeniu mocy przerobowej kopalni na poziomie 100 tys. Mg/rok, w podziemnym składowisku w KS Kłodawa w ciągu jednego roku zapełni się ok. 133 tys. m^3 wyrobisk, tj. ok. 6 komór, a pojemność wyrobisk, którą kopalnia obecnie może przeznaczyć do składowania (ponad 3 mln m^3) wystarczy na ponad 20 lat. Z czasem, wraz z kończeniem eksploatacji w poszczególnych rejonach kopalni objętość przeznaczona do składowania odpadów będzie powiększana.

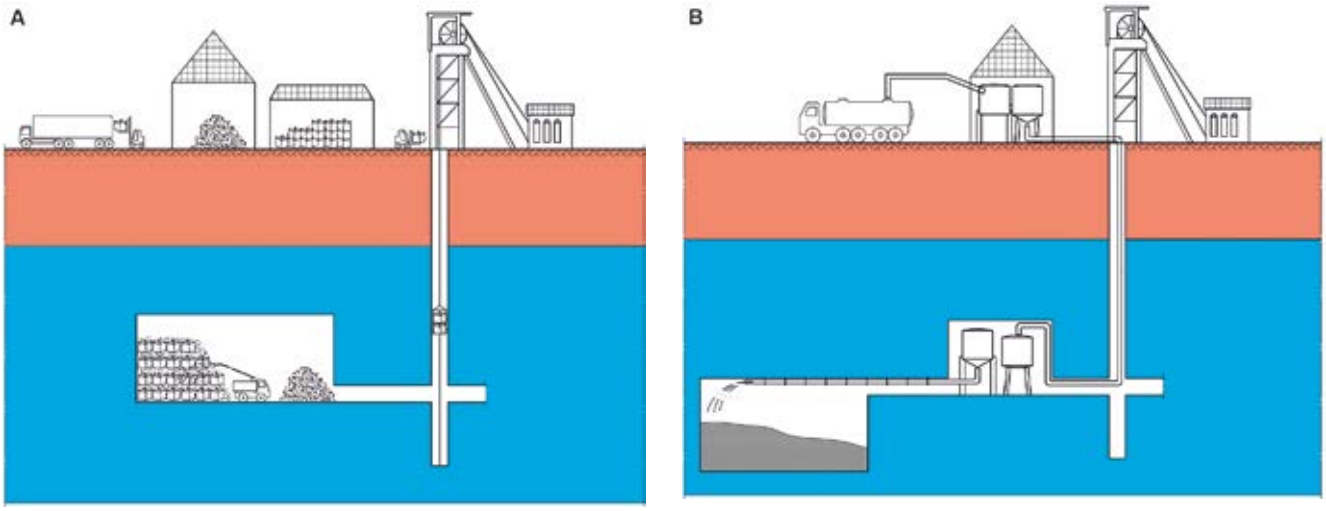
Wymagana objętość wyrobisk przeznaczona do odzysku odpadów w technologii pastowej zależy od składu mieszaniny. Będzie ona jednak mniejsza niż objętość oszacowana dla podziemnego składowania, a więc tempo wypełniania wyrobisk będzie powolniejsze. Przy założonej mocy przerobowej 100 tys. Mg /rok, kopalnia w Kłodawie będzie mogła przyjmować ok. 25% obecnie wytwarzanych odpadów wtórnych z instalacji termicznego przetwarzania odpadów komunalnych, a gdy wszystkie projektowane instalacje zostaną uruchomione – ok. 12%.

Przestrzeń objęta wyrobiskami KS Kłodawa stanowi interesujący przykład górotworu, w którym (z korzyścią dla kopalni z jednoczesnym ograniczeniem ewentualnych odkształceń powierzchni terenu) można zrealizować odzysk niektórych grup odpadów wtórnych ze spalarń odpadów komunalnych w technologii wypełniania wyrobisk, np. przez wypełnianie ich opakowanymi odpadami (worki big-bag), z ewentualnym doszczelnianiem pustek między nimi rozdrobnioną solą lub skałą płonną. Druga ewentualność, to wypełnianie wyrobisk mieszaniną sporządzoną na bazie odpadów o specjalnie opracowanej recepturze, podlegającą transportowi hydraulicznemu i ulegającą w wyrobisku samozestaleniu, bez wydzielania nadmiarowej cieczy zarobowej.

Obydwie technologie są sprawdzone, opanowane technicznie i stosowane w kopalniach soli. Pierwsza z nich nie wymaga specjalnych instalacji, poza tą związaną z transportem opakowań z odpadami. W drugim przypadku konieczna jest budowa instalacji do sporządzania odpowiedniej mieszaniny (np. pasty) odpadów drobnofrakcyjnych ze spalarni, materiału wiążącego i solanki.

Zgodnie z przeprowadzoną analizą SWOT (Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2017) do najważniejszych argumentów przemawiających za celowością zastosowania przedstawionej technologii, korzystnej dla środowiska i gospodarki, można zaliczyć:

– alternatywę dla składowania odpadów na powierzchni ziemi;
– gospodarcze wykorzystanie podziemnych wyrobisk pozostawionych po wydobyciu złóż soli;
– długotrwałą stabilizację górotworu;
– minimalizację deformacji powierzchni terenu jako skutku pozostawienia pustek poeksploatacyjnych.



Rys. 27. Uproszczone schematy technologii podziemnego składowania odpadów: A – opakowanych, B – w technologii wypełniania wyrobisk pastą (Korzeniowski i in., 2015b)

Rys. 28. Przykładowe stanowisko przygotowania podsadzki pastowej (https://www.kpluss.com/en-us/our-business-products/waste-management/underground-recovery/)

Ponadto do sprzyjających okoliczności ułatwiających realizację technologii składowania/magazynowania można zaliczyć:
- centralne położenie geograficzne wysadu solnego i kopalni;
- dobrze rozpoznaną budowę geologiczną złoża;
- regularną strukturę kopalni, korzystną dla logistyki przedsięwzięcia;
- kubaturę wyeksploatowanych wyrobisk zapewniającą bardzo dużą pojemność;
- aktualny, niski poziom zagrożeń naturalnych;
- wyspecjalizowaną kadrę górniczą.

Zastosowanie omawianej technologii wiąże się z:
- budową nowej infrastruktury techniczno-transportowej w kopalni;
- koniecznością przebudowy niektórych wyrobisk;
- zastosowanie dodatkowych środków zabezpieczających przed zagrożeniami naturalnymi w kopalni.

6.2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ORAZ PLANOWANYCH OBIEKTÓW PODZIEMNYCH W POLSCE

Pierwsze w Polsce próby bezzbiornikowego magazynowania gazu w sczerpanym złożu gazu rozpoczęły się w 1954 r. w okolicach Krosna (PMG Roztoki, eksploatacja zakończona w 1980 r.). Jednak znaczny rozwój i uruchomienie pierwszych obiektów nastąpił w latach 70. ub. w. Pierwsze funkcjonujące do dziś magazyny (PMG Brzeźnica i PMG Swarzów) istnieją od 1979 r.

Obecnie (stan na 31.03.2022 r.) na działalność polegającą na bezzbiornikowym magazynowaniu substancji lub składowaniu odpadów w górotworze wydanych jest 14 koncesji (lokalizacja – rys. 29, zestawienie – tab. 27), w tym:
- 10 na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie gazu ziemnego;
- 1 na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie ropy naftowej i paliw płynnych;
- 3 na podziemne składowanie odpadów.

Znane są także trwające lub zarzucone plany budowy sześciu nowych obiektów, w tym trzy magazyny gazu, dwa składowiska odpadów oraz jedno składowisko CO_2 (patrz: rozdz. 6.2.5).

W Polsce obiekty podziemnego magazynowania i składowania są zlokalizowane w wyeksploatowanych złożach gazu (Bonikowo, Brzeźnica, Husów, Strachocina, Swarzów, Wierzchowice, Borzęcin, Husów–Albigowa–Krasne), ropy (Daszewo) oraz w kawernach solnych (Kosakowo, Mogilno i Góra). Najbardziej rozpowszechnioną formą działalności jest podziemne magazynowanie gazu ziemnego. W Polsce jest dziewięć czynnych podziemnych magazynów gazu (PMG): Bonikowo, Brzeźnica II, Husów, Strachocina w województwie podkarpackim, Kosakowo, Mogilno II w województwie pomorskim, Daszewo w województwie zachodniopomorskim, Wierzchowice w województwie dolnośląskim oraz Swarzów w województwie małopolskim. Największą pojemnością magazynową charakteryzuje się złoże Wierzchowice (1,2 mld m^3), następnie Husów (wyeksploatowana część złoża wchodzącego w skład dużego złoża gazu Husów–Albigowa–Krasne; 0,5 mld m^3), Strachocina (0,36 mld m^3), Brzeźnica (0,1 mld m^3) i Swarzów (0,09 mld m^3). W sumie pojemność magazynowa gazu w sczerpanych złożach wynosi 2,25 mld m^3, czyli ok. 71% pojemności podziemnych sezonowych magazynów gazu (wynoszących aktualnie 3,1748 mld m^3 wg https://pgnig.pl/; co odpowiada ok. 17,3% rocznego zużycia gazu podawanego przez Główny Urząd Statystyczny, 2019).

Większość magazynów to magazyny operacyjne, z których gaz przesyłany jest bezpośrednio do sieci gazowej w okresie największego zapotrzebowania, a dwa (Bonikowo i Daszewo) to magazyny techniczne, gdzie gaz (charakteryzujący się wysoką zawartością azotu) przed przesłaniem do sieci jest mieszany w pobliskiej instalacji z gazem wysokometanowym w celu osiągnięcia odpowiedniej kaloryczności, o pojemności odpowiednio 200 i 60 mln m^3 (Kudela, 2014). Trzy z tych (operacyjnych) magazynów gazu to magazyny kawernowe w soli, jeden w wyeksploatowanym złożu ropy a pięć w wyeksploatowanych złożach gazu. Ponadto jest także jeden podziemny kawernowy magazyn ropy i paliw płynnych w wysadzie solnym Góra w województwie kujawsko-pomorskim, zlokalizowany w zaadaptowanych komorach eksploatacyjnych oraz dwa czynne składowiska odpadów pochodzących z eksploatacji złóż węglowodorów: Borzęcin w województwie dolnośląskim i Husów–Albigowa–Krasne w województwie podkarpackim. Oba zlokalizowane są w wyeksploatowanych złożach gazu. W przypadku dwóch koncesji aktualnie nie jest prowadzona działalność (Henrykowice – E oraz Świdnik).

W dalszej części rozdziału scharakteryzowano jedynie wybrane obiekty krajowe, ponieważ szczegółowa charakterystyka wszystkich obiektów w Polsce znajduje się w odpowiednich monografiach lub opracowaniach naukowych (np. Reinisch, 2000; Gąska i in. 2012; Ślizowski K. i in. 2004). Listę udzielonych koncesji na podziemne składowanie i magazynowanie, wraz z aktualnym statusem poszczególnych obiektów oraz podstawowymi informacjami, zestawiono w tabeli 27.

Rys. 29. Lokalizacja obiektów z aktualnymi koncesjami na magazynowanie lub składowanie na podkładzie mapy ogólnogeograficznej w skali 1 : 1 000 000 (https://www.geoportal.gov.pl)

Tabela 27

Zestawienie aktualnych (2022 r.) koncesji na bezzbiornikowe magazynowanie i składowanie (https://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web)

Rodzaj	Nazwa	Status	Substancja/ odpad	Rodzaj obiektu	Operator	Struktura geologiczna	Geologia i stratygrafia	Data udzielenia koncesji	Data zakończenia koncesji	Pojemność czynna/ docelowa	Lokalizacja
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Podziemny Magazyn Gazu	Bonikowo	czynny	zaazotowany gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	monoklina przedsudecka	wapienie cechsztyńskie	03.10.2008	03.10.2058	200 mln m^3 (poj. robocza)	gmina Dębica, pow. dębicki, woj. podkarpackie
Podziemny Magazyn Gazu	Brzeźnica II	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	zapadlisko przedkarpackie	piaskowce mioceńskie (sarmat)	12.06.2013	12.06.2038	100 mln m^3	gmina Dębica, pow. dębicki, woj. podkarpackie
Podziemny Magazyn Gazu	Daszewo	czynny	zaazotowany gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu ropy	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	horyzont złożowy	dolomity cechsztyńskie	10.07.2008	10.07.2058	30 mln m^3/ 60 mln m^3	gmina Karlino, pow. białogardzki, woj. zachodniopomorskie
Podziemny Magazyn Gazu	Henrykowice - E	nieczynny	gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Zakład Projektowania i Usług Technicznych A.i M. Brzozowcy Sp. j.	horyzont złożowy	wapienie cechsztyńskie	31.05.2012	31.05.2037	brak danych	gmina Milicz, pow. milicki, woj. dolnośląskie
Podziemny Magazyn Gazu	Husów	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	zapadlisko przedkarpackie (pod nasunięciem karpackim)	piaskowce mioceńskie (baden i sarmat)	25.08.2011	25.08.2036	500 mln m^3	gmina Łańcut i Markowa, pow. łańcucki, woj. podkarpackie
Podziemny Magazyn Gazu	Kosakowo	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	kawernowe w soli	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	pokładowe złoże soli	sól kamienna cechsztyńska	31.12.2001	31.12.2028	239,40 mln m^3/ 295 mln m^3	gmina Kosakowo, pow. pucki, woj. pomorskie
Podziemny Magazyn Gazu	Mogilno II	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	kawernowe w soli	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	wysad solny	sól kamienna cechsztyńska	27.08.1994	27.05.2024	580,92 mln m^3	gminy Mogilno i Rogowo, pow. mogileński, woj. kujawsko-pomorskie
Podziemny Magazyn Gazu	Strachocina	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	fałd Sanoka–Strachociny (jednost. śląska)	piaskowce kredowo-oligoceńskie	30.12.2010	31.12.2035	360 mln m^3	gmina Sanok i Brzozów, pow. sanocki, woj. podkarpackie
Podziemny Magazyn Gazu	Swarzów	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	horyzont złożowy	piaskowce cenomanu i wapienie turonu	27.08.1994	27.08.2044	90 mln m^3	gmina Dąbrowa Tarnowska i Olesno, pow. dąbrowski, woj. małopolskie
Podziemny Magazyn Gazu	Wierzchowice	czynny	wysokometanowy gaz ziemny	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	pułapka brachy-antyklinalna	wapienie cechsztyńskie	22.05.1995	22.05.2035	1 300 mln m^3/ 2 000 mln m^3	gminy Milicz i Krośnice, pow. milicki, woj. dolnośląskie
Podziemny Magazyn Ropy i Paliw Płynnych	Góra	czynny	ropa naftowa i paliwa płynne	kawernowe w soli	Inowrocławskie Kopalnie Soli "Solino" SA	wysad solny	sól kamienna cechsztyńska	01.09.1999	01.09.2029	3,5 mln t dla ropy i 0,75 mln t dla olejów	gmina Inowrocław, pow. inowrocławski, woj. kujawsko-pomorskie
Podziemne składowisko odpadów	Borzęcin	czynny	gaz kwaśny – CO_2 i H_2S	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	antyklina Borzęcina	wapienie cechsztyńskie	04.12.2003	14.12.2033	350 tyś m^3	gmina Borzęcin, pow. brzeski, woj. małopolskie

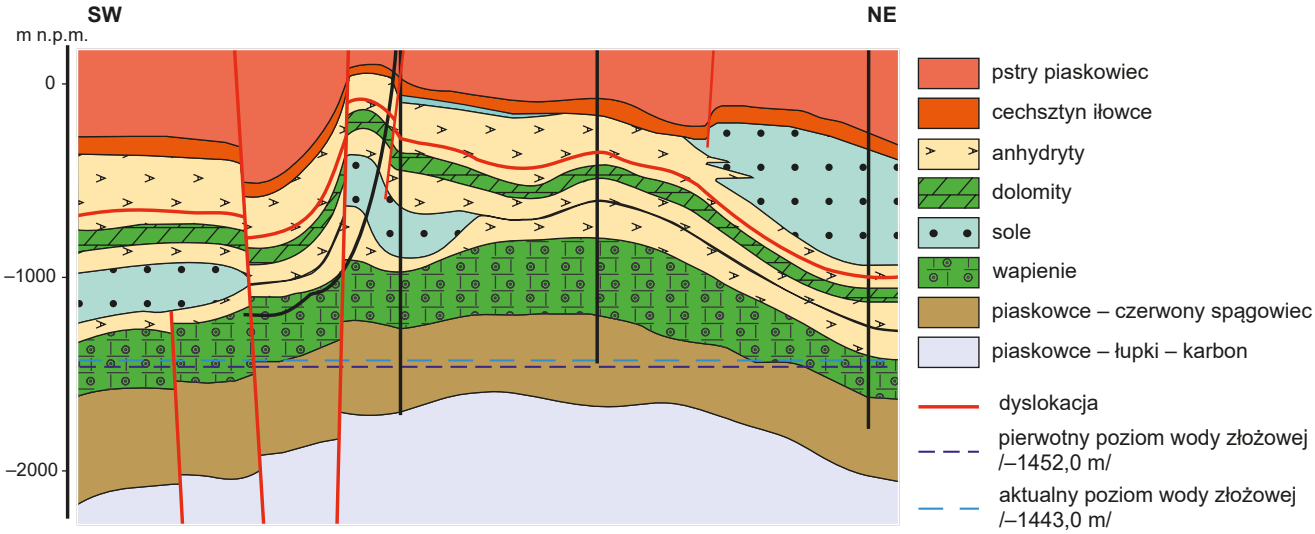
Tabela 27 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Podziemne składowisko odpadów	Husów–Albigowa–Krasne	czynny	odpady płynne	w wyeksploatowanym złożu gazu	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	pułapka strukturalna w obrębie antykliny	piaskowce mioceńskie	23.08.2019	23.08.2049	docelowo 75 tyś m^3	gmina Łańcut i Markowa, pow. łańcucki, woj. podkarpackie
Podziemne składowisko odpadów	Świdnik	nieczynny	wg koncesji: wody złożowe, pochodzące z różnych złóż węglowodorów, płuczki i odpady wiertnicze, odpady dotyczące filtratów zaczynów cementowych, odpady z oczyszczania i transportu gazu, odpady zawierające siarkę, odpady związane z cieczami do osuszania gazu (metanol, glikol dietylenowy)	w wyeksploatowanym złożu ropy	Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA	horyzont złożowy	piaskowce karbońskie	20.09.2002	20.09.2027	brak danych	miasto Świdnik, pow. świdnicki, woj. lubelskie

6.2.1. PMG Wierzchowice

Jako przykład krajowego magazynu gazu w sczerpanym złożu gazu wybrano PMG Wierzchowice (rys. 30). Magazyn wybudowano w sczerpanym złożu gazu zaazotowanego, zlokalizowanym w obrębie basenu permskiego na Niżu Polskim (województwo dolnośląskie, powiat milicki – ok. 40 km na NNE od Wrocławia), występującym w utworach wapienia cechsztyńskiego i czerwonego spągowca na głębokości ok. 1530 m p.p.t. w szczycie struktury antyklinalnej. Podobnie jak wiele innych PMG w sczerpanych złożach gazu i kawernach solnych, służy on do zaspokojenia (z odpowiednim zapasem) zwiększonego zapotrzebowania na gaz gospodarki narodowej i gospodarstw domowych w sezonie grzewczym. Magazyn znajduje się w sąsiedztwie jednego z największych węzłów krajowego systemu gazowniczego w Odolanowie, dzięki czemu możliwe są dostawy gazu z Wierzchowic w kierunku Górnego i Dolnego Śląska, Wielkopolski, Pomorza Zachodniego i centralnej Polski (https://pgnig.pl/). Jest to aktualnie największy podziemny magazyn gazu w Polsce (pojemność czynna 1200 mln m^3, planowana jest rozbudowa do 2000 mln m^3; https://pgnig.pl/). Budowę geologiczną magazynu przedstawiono na rysunku 30.

Złoże gazu ziemnego zaazotowanego Wierzchowice odkryto w 1971 r. i było eksploatowane w latach 1972–1995. Pierwotne zasoby wydobywalne gazu (11,9 mld m^3) zostały sczerpane w blisko 66%. Pod koniec okresu eksploatacji złoża prowadzono analizy pod kątem przekształcenia go w podziemny magazyn gazu. Stwierdzono, że aby uzyskać optymalną pojemność czynną magazynu należy zaniechać dalszej eksploatacji złoża i pozostawić resztę gazu w celu utworzenia poduszki gazowej (bufora) spełniającej rolę zabezpieczenia przyszłej pojemności czynnej PMG, głównie przed niekorzystnym oddziaływaniem wód podścielających. Umożliwiło to rozpoczęcie w 1995 r. budowy PMG (o pojemności czynnej 600 mln m^3) w ciągu niewielu miesięcy od zakończenia eksploatacji złoża. W tym samym roku wykonano pierwszy cykl pracy magazynu – zatłoczono 180,4 mln m^3 gazu i odebrano 101,9 mln m^3 (Gałek, Belczyk, 2012). Z istniejących wtedy na złożu 30 odwiertów, 17 wykorzystano do zatłaczania i odbioru gazu, a pozostałe 13 – jako obserwacyjne (monitoringowe). Ponadto w 1997 r. wykonano jeden nowy odwiert horyzontalny na potrzeby PMG. Do wiosny 2011 r. wykonano 16 cykli zatłaczania i odbioru gazu. W międzyczasie zaplanowano sukcesywną rozbudowę PMG, w pierwszym etapie do 1200 mln m^3. W latach 1999–2005 wykonano 13 rekonstrukcji starych odwiertów w celu dostosowania ich do pracy w reżimie wyższych ciśnień spodziewanych na magazynie po rozbudowie, siedem nowych odwiertów horyzontalnych oraz trzy nowe odwierty horyzontalne w 2010 r. i jeden w kolejnym roku na potrzeby PMG. W 2012 r. zakończono pierwszy etap rozbudowy magazynu, który funkcjonuje od 2013 r. z pojemnością czynną wynoszącą 1200 mln m^3. Obecnie do zatłaczania i odbioru gazu wykorzystuje się 12 odwiertów horyzontalnych oraz kilkanaście obserwacyjnych. Niektóre z tych ostatnich przewidziane są do konwersji na potrzeby zatłaczania i odbioru gazu w kolejnym etapie rozbudowy magazynu. Aktualnie

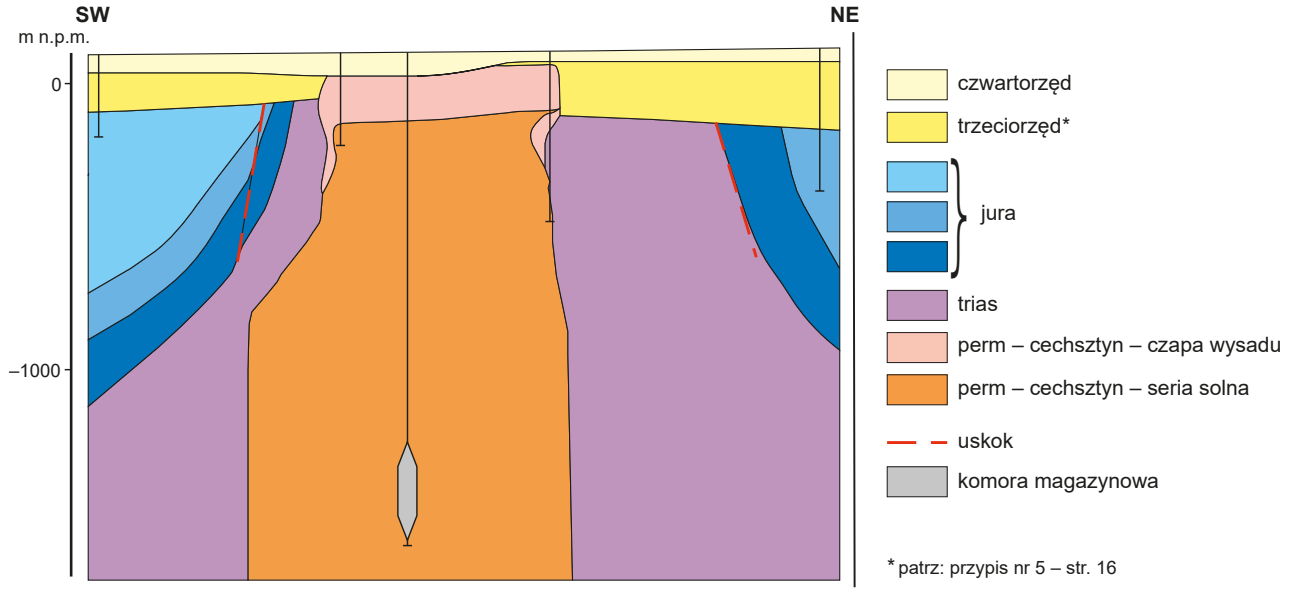


Rys. 30. Uproszczony przekrój geologiczny przez PMG Wierzchowice (wg Gas Storage Poland)

moc zatłaczania gazu w PMG Wierzchowice wynosi 3,6–9,6 mln m^3/dobę, moc odbioru – do 14,4 mln m^3/dobę, nominalny czas zatłaczania – 150 dni/rok, a nominalny czas odbioru – 110 dni/rok (https://pgnig.pl/). W chwili obecnej są prowadzone analizy dotyczące kolejnego etapu rozbudowy PMG Wierzchowice, z 1200 mln^3 do 2000 mln m^3 (op. cit.), przy czym wcześniejsze plany były nawet bardziej ambitne – rozpatrywano wariant docelowy o pojemności magazynowej 3500 mln m^3 (Gałek, Belczyk, 2012).

6.2.2. PKMG Mogilno

Jako przykład magazynu w strukturach solnych wybrano PKMG Mogilno (Podziemny Kawernowy Magazyn Gazu Mogilno), gdyż jest on pierwszym magazynem kawernowym w Polsce (rys. 31). Powstał dzięki podjętej w 1986 r. przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo decyzji o realizacji prac badawczo-rozwojowych dotyczących budowy pierwszego podziemnego kawernowego magazynu gazu ziemnego (Gąska i in., 2012). Wybór na magazyn wysadu Mogilno był podyktowany następującymi czynnikami: położeniem (centrum Polski, bliskość systemu gazowniczego), dobrym rozpoznaniem budowy geologicznej i ustalonymi zasobami soli kamiennej (udokumentowane dwa złoża soli kamiennej w wysadzie, dostępne dane archiwalne, w tym profile otworów wiertniczych, badania sejsmiczne oraz badania na potrzeby działalności kopalni) i funkcjonowaniem w części wysadu (złoże Mogilno I) otworowej kopalni soli (wykorzystanie jej infrastruktury i doświadczeń do realizacji kawern magazynowych). Eksploatacja obiektu rozpoczęła się w 1997 r., kiedy to załoczono gaz do trzech komór o pojemności roboczej 72,5 mln m^3. Oficjalne otwarcie PKMG Mogilno nastąpiło w 1998 r. wraz z oddaniem do eksploatacji sieci gazowniczej i ośrodka na powierzchni (Gąska



Rys. 31. Uproszczony przekrój geologiczny przez PKMG Mogilno (wg Gas Storage Poland)

i in., 2012). Pierwszy etap budowy magazynu (lata 1989–2005) zakończył się wykonaniem 10 kawern o pojemności roboczej 416,73 mln m^3. W 2007 r. PGNiG SA podjęto decyzję o rozbudowie magazynu do pojemności roboczej 800 mln m^3.

Magazyn powstał w wysadzie solnym (sól kamienna) w obrębie złoża Mogilno II. Wysad zlokalizowany jest w północno-wschodniej części synklinorium łódzko-mechowskiego i tworzą go permskie sole cechsztynu (trzech cyklotemów: Stassfurt, Leine i Aller). Charakteryzują się małym udziałem soli potasowo-magnezowych oraz anhydrytu i iłu, stąd są dobrym ośrodkiem do ługowania kawern. Obecnie pojemność czynna magazynu to 580,92 mln m^3 (wg danych operatora – Gas Storage Poland, stan na koniec 2022 r.). Na magazyn składa się 14 czynnych kawern magazynowych, zlokalizowanych na głębokościach 600–1800 m. Jest on włączony do krajowego systemu gazowniczego, a możliwości jego rozbudowy o kolejne kawerny wydają się dość ograniczone, gdyż część wysadu (złoże soli kamiennej Mogilno I) jest eksploatowana otworowo w celu pozyskania solanki, chyba że część kawern po eksploatacji soli zostanie zaadaptowana do magazynowania paliw, podobnie jak w wysadzie Góra.

6.2.3. PSO Husów–Albigowa–Krasne

W Polsce składowanie odpadów w górotworze nie jest tak powszechne jak magazynowanie gazu. Jedynym typem działalności jest zatłaczanie odpadów do sczerpanych złóż węglowodorów. Obecnie (stan na czerwiec 2022 r.) wydane są trzy koncesje na podziemne składowanie odpadów, w tym dwie z nich są wykorzystywane (Borzęcin oraz Husów–Albigowa–Krasne), a w przypadku trzeciej działalność ta została praktycznie zakończona z uwagi na zanikające wydobycie węglowodorów w jej sąsiedztwie (Świdnik).

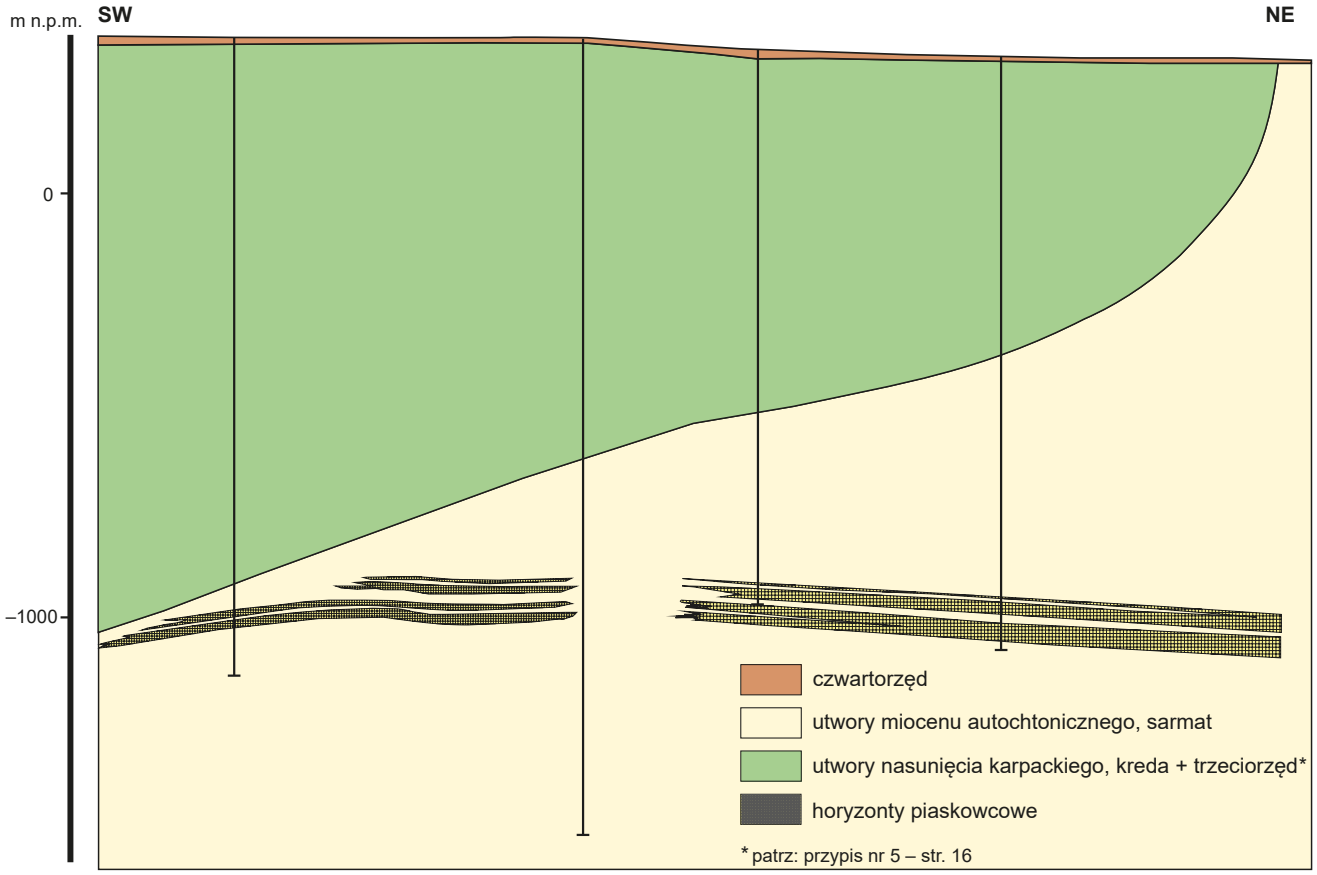
Jako przykład składowiska podziemnego wybrano PSO Husów–Albigowa–Krasne, zlokalizowane w złożu o tej samej nazwie, ponieważ obok składowiska w obrębie złoża nadal prowadzona jest eksploatacja gazu ziemnego wraz z zatłaczaniem wód złożowych oraz zlokalizowany jest podziemny magazyn gazu (PMG Husów). Struktura ta jest zatem bardzo intensywnie zagospodarowana oraz bardzo dobrze rozpoznana, zarówno badaniami sejsmicznymi, jak i otworami wiertniczymi. Ponadto, z uwagi na kończącą się w 2019 r. koncesję, w 2018 r. opracowano dokumentację geologiczno-inżynierską, która zebrała i zaktualizowała dotychczasowe dane.

PSO Husów–Albigowa–Krasne istnieje od 2001 r. Zlokalizowany jest w utworach miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego, w dwóch horyzontach złoża gazu ziemnego Husów–Albigowa–Krasne (VII i VIIa) zbudowanych z piaskowca o dobrych parametrach zbiornikowych. Jest to jedno z największych złóż gazu ziemnego, udokumentowano w nim 27 horyzontów złożowych. Zaplanowano zmagazynowanie w nim 75 tys. m^3 ciekłych odpadów, co odpowiada wtłaczaniu średnio ok. 3 tys. m^3/rok (Gonet i in., 2005). Horyzonty magazynowe są izolowane od stropu i spągu utworami ilasto-łupkowymi o miąższości kilkudziesięciu metrów (Ptak i in., 2018). Zostały one wybrane ze względu na bardzo dobry stopień rozpoznania i dobre warunki izolacji. Horyzonty te znajdują się na głębokości poniżej 895 m. Zatłaczanie odpadów ciekłych odbywa się jednym odwiertem (Krasne-8), który był wcześniej otworem eksploatacyjnym, a wód złożowych – trzema odwiertami. W skład odpadów wchodzą głównie wody złożowe, technologiczne i inne odpady płynne nienadające się do regeneracji, a powstałe podczas eksploatacji złóż węglowodorów i obróbki gazu ziemnego oraz ropy naftowej. W dokumentacji (Ptak i in., 2018) przyjęto ilość ok. 760 m^3 odpadów na rok. Poglądowy przekrój przez omawiane złoże przedstawiono na rysunku 32.

6.2.4. Podziemne składowisko CO_2 Wojszyce

Obecnie w Polsce nie istnieje żaden zagospodarowany kompleks podziemnego składowania CO_2. Jedynie w ramach projektu demonstracyjnego (tylko takie są w obecnym stanie prawnym dopuszczalne – patrz: cz. I, rozdz. 8.2.3) o nazwie CCS (ang. *Carbon Capture and Storage*) PGE Bełchatów realizowanego w latach 2009–2013 (https://pgegiek.pl/Ochrona-srodowiska/CCS/Instalacja-demonstracyjna-CCS) wytypowano do tego celu strukturę Wojszyce, położoną na NNE od Łodzi, w poziomach solankowych wodonośnych – piaskowcach jury (struktura antyklinalna na poduszce solnej) – która miała być następnie rozpoznana szczegółowo (udokumentowana). Wybór ten wynikał z rankingu struktur zidentyfikowanych w rejonie Bełchatowa (Wójcicki i in., 2013), sporządzonego na podstawie wyników nowych badań geofizycznych oraz analiz materiałów archiwalnych. Jednak całe przedsięwzięcie (projekt demonstracyjny CCS) anulowano w 2013 r. Obejmowało ono w komponencie składowania prace rozpoznawcze wykonywane na podstawie projektów robót geologicznych (w tym czasie nie były jeszcze wdrożone do prawa polskiego zapisy Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady [29], stąd nie było w tym przypadku możliwe ubieganie się o koncesję na poszukiwanie lub rozpoznawanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla). W lokalizacji wykonano badania sejsmiczne 2D i grawimetryczne oraz odwiercono nowe otwory badawcze w rejonach Wojszyc i Lutomierska-Tuszyna. Oprócz wyników nowych badań w rejonach Wojszyc i Lutomierska-Tuszyna wykorzystano do analiz dostępne materiały archiwalne, natomiast analizy dla lokalizacji Budziszewice-Zaosie oparto jedynie na relatywnie bogatych materiałach archiwalnych. Rozpatrywana głębokość składowania dla struktur w rejonie Bełchatowa to 1000–2000 m.

[29] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.



Rys. 32. Uproszczony przekrój geologiczny przez złoże Husów–Albigowa–Krasne (wg Gas Storage Poland)

6.2.5. Planowane obiekty podziemne

W czasie opracowywania poradnika (stan na grudzień 2022) były znane (trwające do dziś lub zarzucone) plany budowy sześciu nowych obiektów:

– w naturalnych strukturach geologicznych:
  - PMG Marianowo – obiekt zaplanowano w warstwach wodonośnych, opracowano projekt robót geologicznych dla szczegółowego rozpoznania struktury, przedsięwzięcie zarzucono po wykonaniu sejsmiki 3-D (2013),
  - PSCO_2 Wojszyce – obiekt zaplanowano w warstwach wodonośnych, gdzie przewidziano składowanie CO_2, przeprowadzono rozpoznanie wstępne i opracowano dokumentację geologiczną inną, wskazano strukturę jako planowane składowisko dla projektu demonstracyjnego CCS PGE Bełchatów, przedsięwzięcie zarzucono na etapie przetargu na II etap (szczegółowy) rozpoznania (2013);

– w strukturach antropogenicznych:
  - PKMG Damasławek – obiekt kawernowy w wysadzie solnym Damasławek, w 2013 r. Inwestor (Gaz-System SA) uzyskał koncesje na poszukiwanie i rozpoznawanie złoża soli kamiennej (koncesja obowiązywała do 2018 r.). Została dla niego opracowana także dokumentacja geologiczna (2020), obecnie są prowadzone prace nad dokumentacją geologiczno-inżynierską i hydrogeologiczną oraz nad Projektem Zagospodarowania Złoża (PZZ) do budowy kawernowego magazynu gazu,
  - PKMG Goleniów – obiekt kawernowy w wysadzie solnym Goleniów, została dla niego opracowana dokumentacja geologiczna (2013), wysad rozpoznano na podstawie koncesji, obecnie projekt zarzucono,
  - PSO Mogilno – obiekt zaplanowano w wyrobiskach po eksploatacji soli przystosowanych do składowania odpadów, projekt w fazie koncepcji, są prowadzone prace studialne nad możliwością składowania odpadów w wyeksploatowanych kawernach pogazowych,
  - PSO Kłodawa – obiekt zaplanowano w kopalni soli, została dla niego opracowana dokumentacja geologiczna (2016) oraz projekt zagospodarowania złoża (2019), przewidziano podsadzanie komór poeksploatacyjnych materiałem odpadowym (głównie z eksploatacji soli) w celu zabezpieczenia wyrobisk.

Cztery z tych obiektów to obiekty w wysadach solnych, a dwa – w warstwach wodonośnych. Nie są znane plany grupy PGNiG SA dotyczące budowy podziemnych magazynów gazu w strukturach wyeksploatowanych złóż węglowodorów. Były prowadzone i zlecane przez PGNiG SA prace studialne dotyczące możliwości wykorzystania sczerpanych złóż gazu do konwersji na PMG (np. złóż: Brzostowo, Czeszów, Żuchlów

– Piesik-Buś, Zamojcin, 2015). W przypadku złoża Żuchlów PGNiG SA było partnerem konsorcjum projektu unijnego SiteChar (7 Program Ramowy; https://cordis.europa.eu/project/id/256705/pl), gdzie prowadzono m.in. prace studialne na temat możliwości wykorzystania sczerpanego złoża gazu Żuchlów jako składowiska dwutlenku węgla. Wyżej wymienione trzy sczerpane złoża gazu były także rozpatrywane jako potencjalne składowiska dwutlenku węgla (Wójcicki i in., 2013).

Z kolei niemiecka firma UGS Energy planowała w ostatniej dekadzie budowę „euromagazynu" gazu ziemnego na pograniczu Polski i Niemiec, w którym byłyby przechowywane zapasy strategiczne gazu na potrzeby obszaru transgranicznego Niemiec i Polski. Wybrano do tego celu mezozoiczną strukturę antyklinalną Marianowo, gdzie planowano budowę magazynu o pojemności 1,5 mld m^3 (https://inzynieria.com/) w utworach węglanowych i piaskowcach kredy. Następnie rozważano wykorzystanie do tego celu utworów jury – wykonano na strukturze i w jej otoczeniu prace rozpoznawcze na podstawie projektów robót geologicznych (Biernat i in., 2014; Kapuściński, Kołpaczyński, 2018), ale najprawdopodobniej nie wykonano przewidzianych w ostatnim projekcie robót geologicznych trzech otworów badawczych (jedynie sejsmikę 3-D i analizę materiałów archiwalnych). Do chwili obecnej nie wybudowano tam magazynu i brak jest informacji o dalszych losach przedsięwzięcia – najprawdopodobniej zostało ono zarzucone. Należy przy tym nadmienić, że struktura Marianowo w utworach jury i triasu była rozpatrywana jako potencjalny magazyn gazu, natomiast nie brano tego miejsca pod uwagę jako potencjalnego składowiska dwutlenku węgla z uwagi na brak odpowiedniego uszczelnienia (Wójcicki i in., 2013).

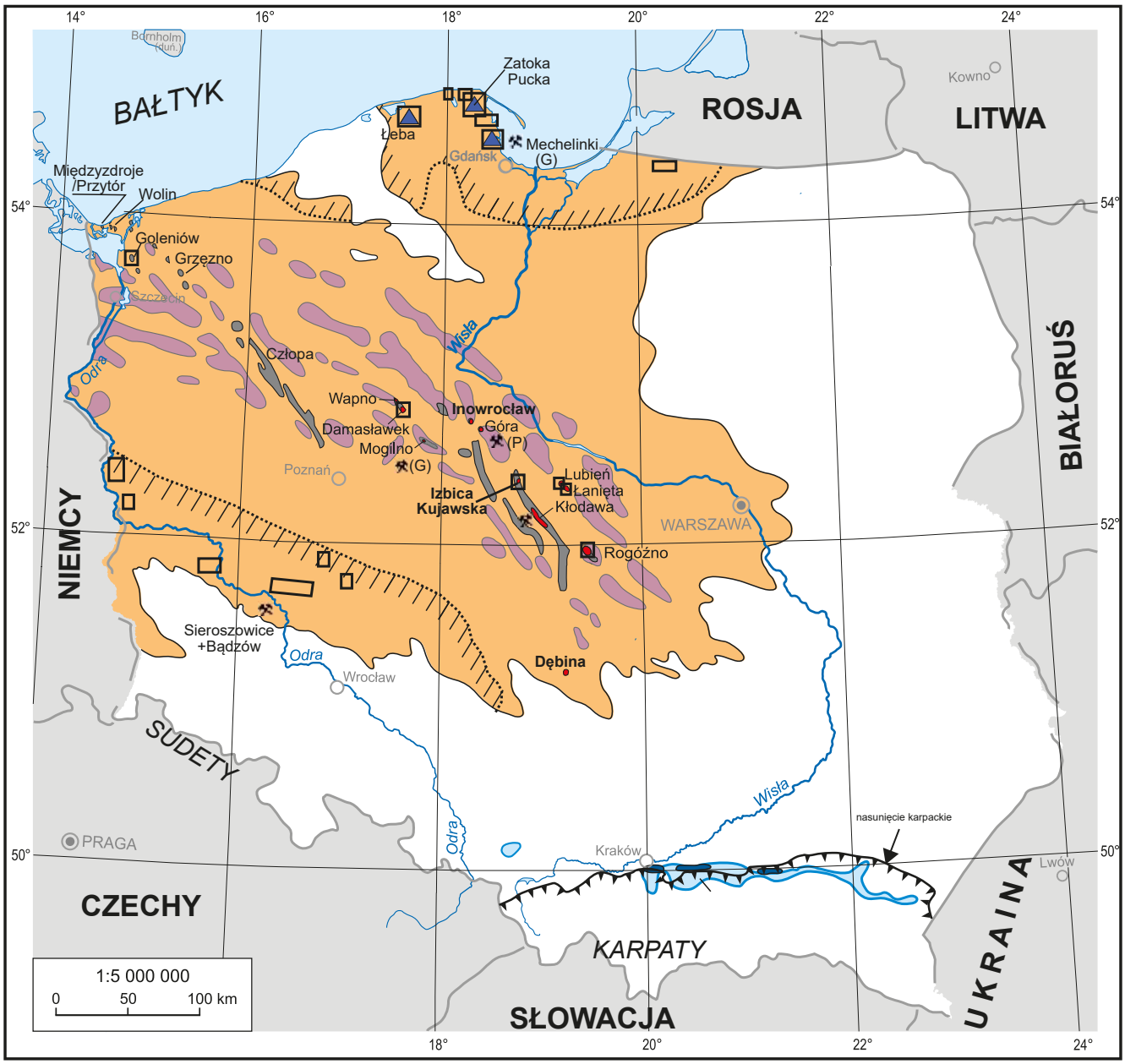
Projektem o pewnym stopniu zaawansowania jest także wspomniana wcześniej koncepcja technologii odzysku w KS Kłodawa (patrz: rozdz. 6.1.4).

Poza obiektami o znacznym stopniu zaawansowania, istnieje również wiele opracowań regionalnych, głównie dla utworów solnych. Autorzy licznych publikacji w ostatnim 20-leciu przedstawili geologiczne możliwości lokalizacji nowych kawernowych magazynów węglowodorów w utworach solnych (np. Poborska-Młynarska, 2000; Ślizowski K. i in., 2006; Maciejewski, 2008; Stopa i in., 2008; Ślizowski J., Urbańczyk, 2011; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Kaliski i in., 2013; Zeljaś, 2020; Czapowski, 2022). Także w ramach polityki budowy tzw. magazynów energii w ostatnich latach analizowano możliwość magazynowania wodoru (pozyskanego w procesie hydrolizy w okresach nadwyżek energetycznych) w kawernach wyługowanych w utworach solnych w Polsce (np. Chromik, 2015, 2016; Tarkowski, 2017; Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018; Czapowski, 2019; Lankof, Tarkowski, 2020).

Dotychczas nie wykonano w Polsce w solach kamiennych żadnego składowiska odpadów, chociaż istniały plany lokowania odpadów stałych w wyrobiskach podziemnych pokładowego złoża Sieroszowice/Bądzów (np. Kłeczek i in., 1994; Kłeczek, Zeljaś, 2004; Wojnar i in., 2013; Andrusikiewicz i in., 2019) czy w wyrobiskach podziemnych w wysadzie solnym Kłodawa (np. Poborska-Młynarska, 2000). Oceniano również przydatność wysadów solnych do składowania dwutlenku węgla (Tarkowski, Uliasz-Misiak, 2003; Tarkowski, 2005; Poborska-Młynarska, 2008).

Ogromny potencjał zasobowy soli kamiennej, głównie soli cechsztyńskiej, skłonił do wytypowania nowych struktur solnych i obszarów, gdzie wystąpienia tej soli sprzyjają budowie w nich kawern magazynowych. Kryterium selekcji w przypadku wystąpień typu pokładowego była maksymalna głębokość zalegania spągu pokładu (do 2 km), warunkowana stosowanymi obecnie metodami górniczymi i optymalnym dla ich funkcjonowania przedziałem głębokości umieszczenia kawern w górotworze solnym (1,2–1,4 km – Ślizowski J. i in., 2007). W przypadku wysadów solnych istotne było płytkie położenie stropu wysadu i stopień rozpoznania jego budowy.

Wytypowano 23 lokalizacje (rys. 33), obejmujące sześć dotychczas niezagospodarowanych wysadów solnych w środkowej i północno-zachodniej Polsce (Goleniów, Damasławek, Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta i Rogóźno) oraz 16 obszarów występowania pokładów soli, w tym sześć obszarów na terenie przedsudeckim i siedem w północnej Polsce (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, Tarkowski 2018; Czapowski, 2019, 2022). Wysad Dębina, chociaż występuje płytko, nie wydaje się przydatnym do budowy kawernowego magazynu czy składowiska ze względu na położenie w centrum eksploatowanego odkrywkowo złoża węgla brunatnego Bełchatów. Możliwe do wykonania w wytypowanych strukturach solnych kawerny solne mogą być wykorzystane zarówno do pozyskiwania solanki, jak i do magazynowania węglowodorów (gazu ziemnego, metanu, ropy naftowej, paliw) oraz innych gazów (np. wodoru czy sprężonego powietrza). Po wykorzystaniu, jako magazyny mogą służyć jako składowiska zależnie od potrzeb. Przedstawione analizy dowodzą, że w Polsce istnieje wiele miejsc, w których możliwe jest budowanie kawern solnych jako najbardziej efektywnej formy zarówno pozyskiwania chlorku sodu, jak i magazynowania różnych mediów. Wysad Damasławek w latach 80–90. ub. w. był rozpatrywany pod względem potencjalnej lokalizacji do podziemnego składowania odpadów promieniotwórczych (np. Garlicki, 1997).

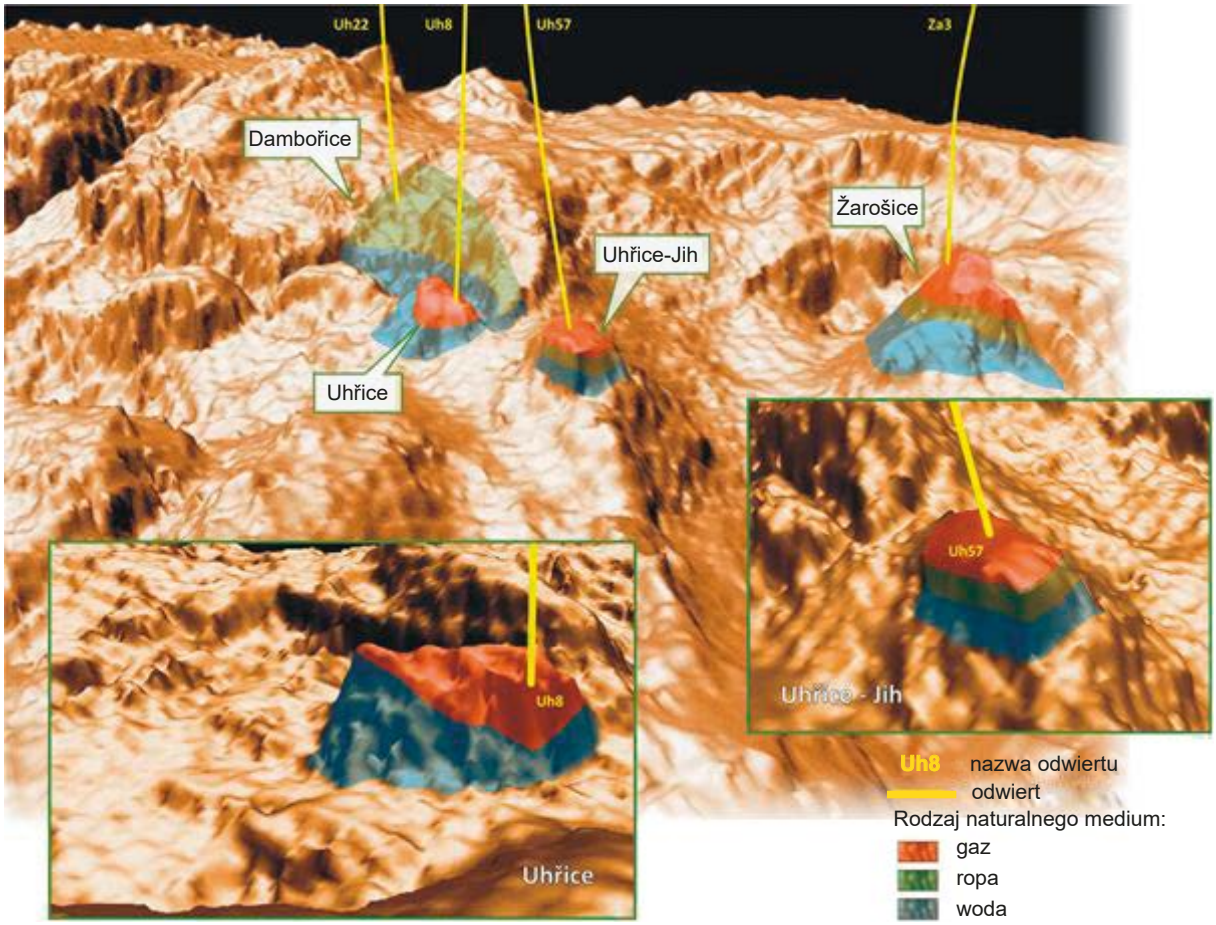


Rys. 33. Możliwości lokalizacji kawern magazynowych w strukturach solnych w Polsce (Czapowski, 2019; uzupełnione)

7. PRZYKŁADY WYBRANYCH FUNKCJONUJĄCYCH I PLANOWANYCH OBIEKTÓW PODZIEMNYCH NA ŚWIECIE

W celu zaprezentowania podziemnych magazynów i składowisk funkcjonujących na świecie lub planowanych do realizacji, wybrano i opisano kilka interesujących przykładów. Zostały one wytypowane na podstawie subiektywnej oceny, mając na uwadze dostępność informacji oraz w szczególności kierując się ich rozmiarem, specyficznym ułożeniem komór lub faktem, że obiekt był pionierski w swoim rodzaju. Charakterystyka obejmuje przykłady podziemnych obiektów w formacjach złóż węglowodorów, w formacjach wodonośnych, w formacjach złóż węgla kamiennego, w komorach solnych, w komorach skalnych oraz w wyrobiskach kopalń podziemnych.

Duży kompleks podziemnych bezzbiornikowych magazynów gazu wybudowany w latach 2001–2016 **w formacjach złóż węglowodorów** funkcjonuje w południowo-wschodnich Czechach, na terenie Moraw. W skład tego kompleksu wchodzą trzy podziemne magazyny gazu: PZP Uhřice, PZP Uhřice-Jih, PZP Dambořice, zlokalizowane w złożach ropy naftowej i gazu o nazwie Dambořice–Uhřice (rys. 34) (https://www.mnd-energystorage.cz/en/). Magazyn PZP Uhřice powstał w sczerpanych złożach gazu, a magazyny PZP Uhřice-Jih i PZP Dambořice – w złożach eksploatowanych, natomiast magazynowanie gazu odbywa się ze wspomaganiem wydobycia ropy naftowej i/lub gazu (tab. 28).



Rys. 34. Lokalizacja PZP w złożach ropy naftowej i gazu w rowie Nesvačilka na Morawach w Czechach (badania sejsmiczne 3D) (https://www.mnd-energystorage.cz/en/)

Tabela 28

Podstawowe parametry podziemnych magazynów gazu na terenie Moraw w południowo-wschodniej części Czech (Hladik in., 2008; Šťastný, 2018; https://kkcg.com/upload/article/pr-gas-storage-damborice-27-6-2016-eng-09795.pdf; https://kkcg.com/cs/mnd-gas-storage; https://kkcg.com/cs/moravia-gas-storage)

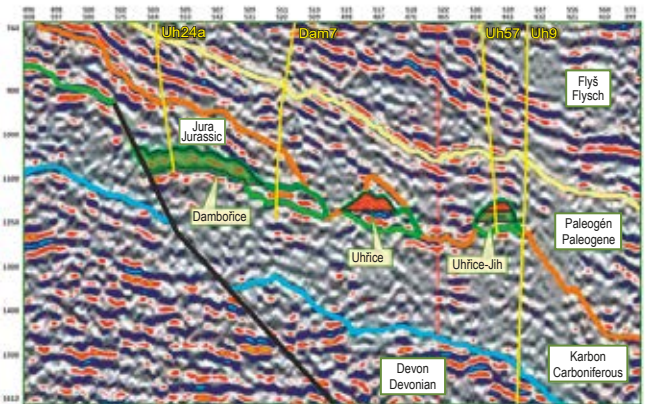
Nazwa podziemnego magazynu gazu	PZP Uhřice	PZP Uhřice-Jih	PZP Dambořice
Rok rozpoczęcia eksploatacji	2001	2012	2016
Rodzaj struktury geologicznej	warstwy wyeksploatowanego złoża gazu	warstwy eksploatowanego złoża ropy naftowej i gazu	warstwy eksploatowanego złoża ropy naftowej
Rodzaj skały zbiornikowej	piaskowce, zlepieńce		
Głębokość stropu horyzontu magazynowego [m]	1700–1850	1800–1900	1450–1600
Porowatość skały zbiornikowej [%]	25		12–25
Przepuszczalność skały zbiornikowej [mD]	b.d.		15–3000
Pojemność czynna [mln m^3]	100	180 (2016 r.) 220 (2020 r.) 240 (2025 r.)	448
	280 (2016 r.) 320 (obecnie) 340 (2025 r)		
Moc zatłaczania [mln m^3/dzień]	5,4		4,5
Moc odbioru [mln m^3/dzień]	10,0		7,5
Zakres ciśnień pracy [MPa]	b.d.		9,5–18,5

b.d. – brak danych

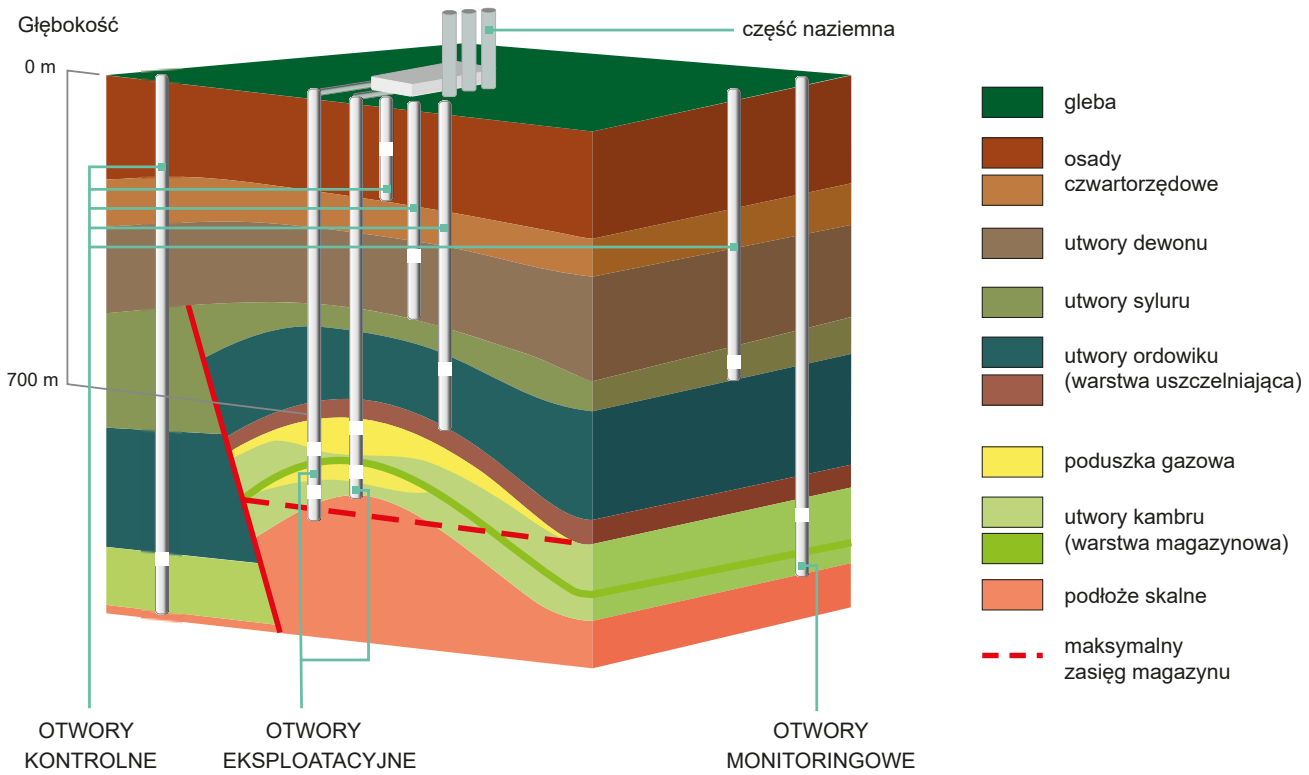
Struktury geologiczne, w których wybudowano magazyny tworzą pułapki geologiczne usytuowane w przedziale głębokości 1450–1900 m. Warstwy zbiornikowe magazynów są zbudowane z jurajskich skał osadowych, głównie ze średnio- i gruboziarnistych piaskowców kwarcowych i zlepieńców formacji Gresten oraz z, leżących nad nimi, piaskowców formacji nikolczyckiej o miąższości całkowitej 10–135 m (rys. 35). Warstwy te charakteryzują się doskonałymi właściwościami zbiornikowymi (tab. 28). Kompleks uszczelniający stanowią paleogeńskie skały osadowe wykształcone jako iłowce i mułowce (flisz) o miąższości 200–400 m (Hladik in., 2008; Šťastný 2018) (rys. 35, tab. 28). Sumaryczna pojemność podziemnych magazynów PZP Uhřice, PZP Uhřice-Jih, PZP Dambořice stanowi największy kompleks podziemnego magazynowania gazu w Czechach, a sam magazyn PZP Dambořice stanowi ok. 12% całkowitej pojemności magazynowanego gazu we wszystkich czeskich obiektach podziemnych (tab. 28).

Podziemny bezzbiornikowy magazyn gazu PMG Inčukalns powstał w latach 60. XX w. na Łotwie, ok. 30 km na północny wschód od Rygi (Jansons i in., 2014). Magazyn ten zlokalizowano **w formacji wodonośnej**, występującej od głębokości 700 m p.p.t. i głębiej, stwierdzonej na obszarze południowo-wschodniej części basenu bałtyckiego (rys. 36). Warstwa zbiornikowa PMG Inčukalns jest wykształcona w postaci piaskowców kambru, a kompleks uszczelniający tworzą skały ordowiku.

W formacji tej występują liczne złoża węglowodorów, głównie ropy naftowej wraz z gazem towarzyszącym. Złoża te występują na obszarze lądowym i morskim zarówno Łotwy, Litwy, Rosji, jak i Polski – w przypadku naszego kraju głównie w strefie ekonomicznej Bałtyku (Vernon i in., 2013). Na obszarze Łotwy rozpoznano 11 analogicznych formacji wodonośnych, o szacowanej całkowitej pojemności większej, podobnej lub mniejszej niż w przypadku PMG Inčukalns (Jansons i in., 2014). Pojemność czynna opisywanego



Rys. 35. Przekrój sejsmiczny obrazujący struktury geologiczne, w których zlokalizowano PZP na Morawach w Czechach (https://www.mnd-energystorage.cz/en/)



Rys. 36. PMG Inčukalns w formacji wodonośnej w piaskowcach kambru (Jansons i in., 2014)

magazynu wynosi 2320–3200 mln m^3, co odpowiada sumarycznej pojemności wszystkich podziemnych magazynów gazu w Polsce. Natomiast pojemność całkowita magazynu, w tym poduszki gazowej, to 4470 mln m^3. Magazyn jest wykorzystywany do zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego Łotwy i był wielokrotnie rozbudowywany w celu zwiększania jego pojemności (Jansons i in., 2014).

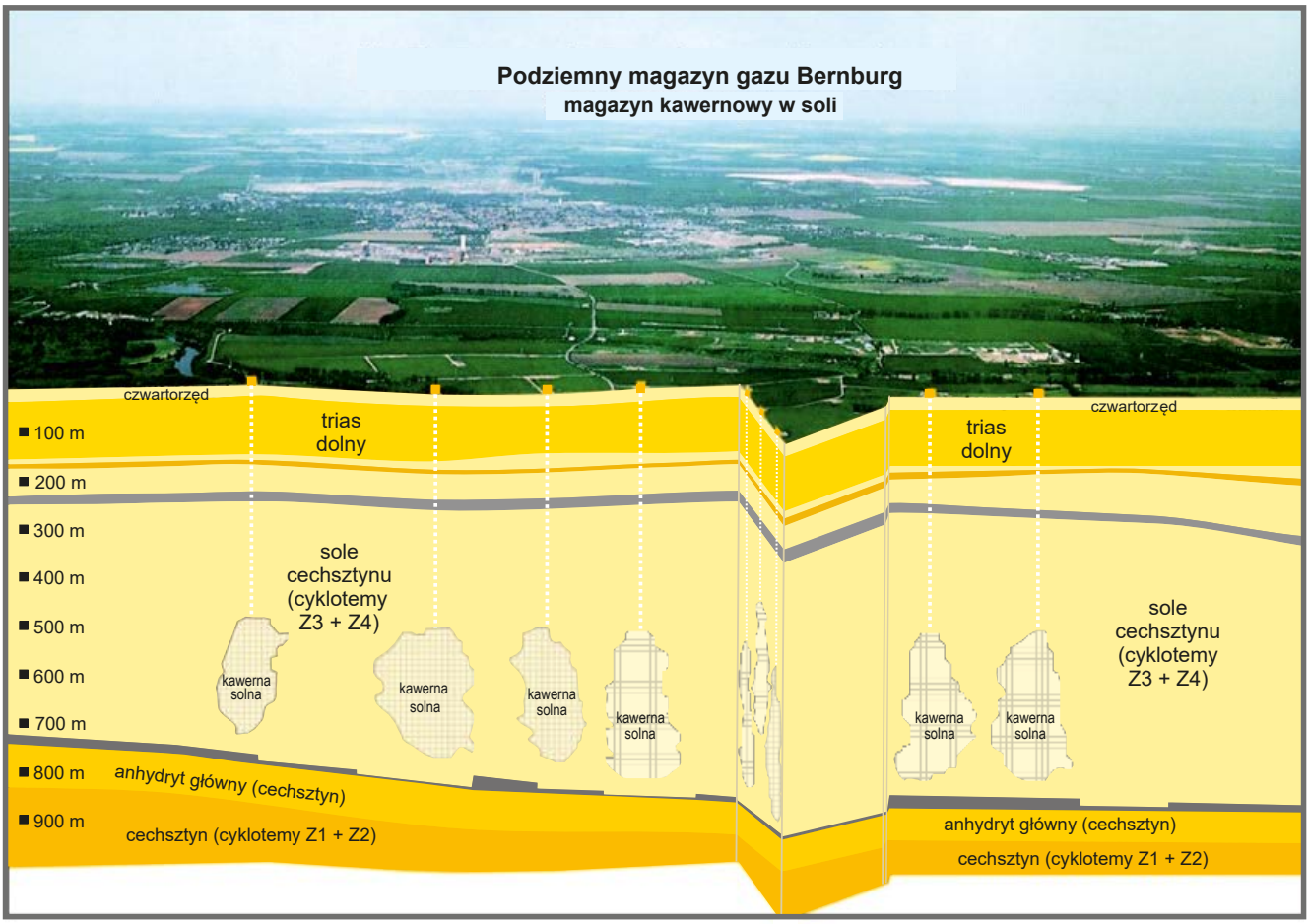
Na świecie nie funkcjonują podziemne składowiska dwutlenku węgla **w formacjach złóż węgla kamiennego** na skalę przemysłową. Pilotażowy projekt badawczy w zakresie możliwości stosowania technologii składowania dwutlenku węgla w nieeksploatowanych złożach węgla kamiennego (zwanej CO2-ECBMR) przeprowadzono w basenie San Juan w stanie Nowy Meksyk, Stany Zjednoczone (Davis i in., 2004). Celem projektu była ocena efektywności wspomagania wydobycia metanu m.in. przez zatłaczanie CO_2 i mieszanin CO_2 z N_2 oraz składowanie CO_2 w głębokich, nieeksploatowanych złożach węgla kamiennego, gdzie prowadzono wcześniej otworową eksploatację metanu (Koperna i in. 2009). Zatłaczanie prowadzono do węgla górnokredowego formacji Fruitland, na głębokości ok. 1 km, w sumarycznej ilości ok. 18 tys. ton CO_2. Prowadzono monitoring środowiskowy (gleby/powietrza glebowego i powietrza atmosferycznego) wokół otworu iniekcyjnego, składu wydobywanego gazu oraz ruchów pionowych powierzchni terenu (czuły inklinometr i interferometria satelitarna). Prace nie były kontynuowane w większej skali z powodu uwarunkowań ekonomicznych, tzn. produkcja metanu nie była konkurencyjna cenowo w porównaniu z gazem wydobywanym w rezultacie boomu łupkowego w Stanach Zjednoczonych Ameryki.

Na terenie Niemiec zlokalizowano pięć podziemnych bezzbiornikowych magazynów gazu **w komorach solnych** wyługowanych w wysadach solnych. Magazyn UGS Bernburg jest położony w regionie Saksonia-Anhalt, działa od 1974 r. i jest czwartym co do wielkości magazynem tego rodzaju w Europie. Składa się z 33 komór solnych o łącznej pojemności 865 mln m^3, ulokowanych na głębokości ok. 511 m. Przeciętna komora ma średnicę do 100 m, wysokość – 50–500 m i objętość do ok. 50 mln m^3 (rys. 37).

Pozostałe cztery magazyny tego typu to:

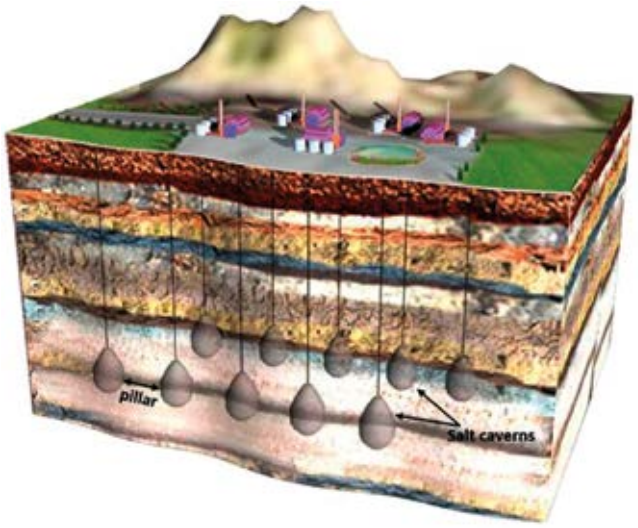
- UGS Etzel w Dolnej Saksonii: działa od 2012–2014 r., 15 komór solnych, o łącznej pojemności 112 mln m^3 (w latach 70. ub. w. magazynowano w wysadzie ropę naftową) (Depowski, 1973);
- UGS Jemgum w Dolnej Saksonii: działa od 2009 r., 15 komór solnych, o łącznej pojemności 147 mln m^3;
- UGS Bad Lauchstädt w Saksonii-Anhalt: działa od 1976 r., 17 komór solnych, o łącznej pojemności 1067 mln m^3;
- UGS Nüttermoor w Dolnej Saksonii: 16 komór o wysokości do 420 m, średnicy 80 m i pojemności 400–700 tys. m^3, spąg komór sięga do głębokości 1,4 km, łączna pojemność magazynu – 1,0 mld m^3 (https://www.daub-ita.de/en/tunnel-projects/deutschland/the-nuettermoor-underground-natural-gas-storage).

Największy na świecie magazyn ropy naftowej i paliw w komorach solnych wyługowanych w wysadzie solnym Bryan Mound zlokalizowany jest w miejscowości Freeport w stanie Teksas w Stanach Zjednoczonych. W 20 komorach o wysokości ok. 610 m i średnicy ponad 60 m mieści się 250 mln baryłek ropy naftowej (https://www.atlasobscura.com/places/bryan-mound-strategic-petroleum-reserve).



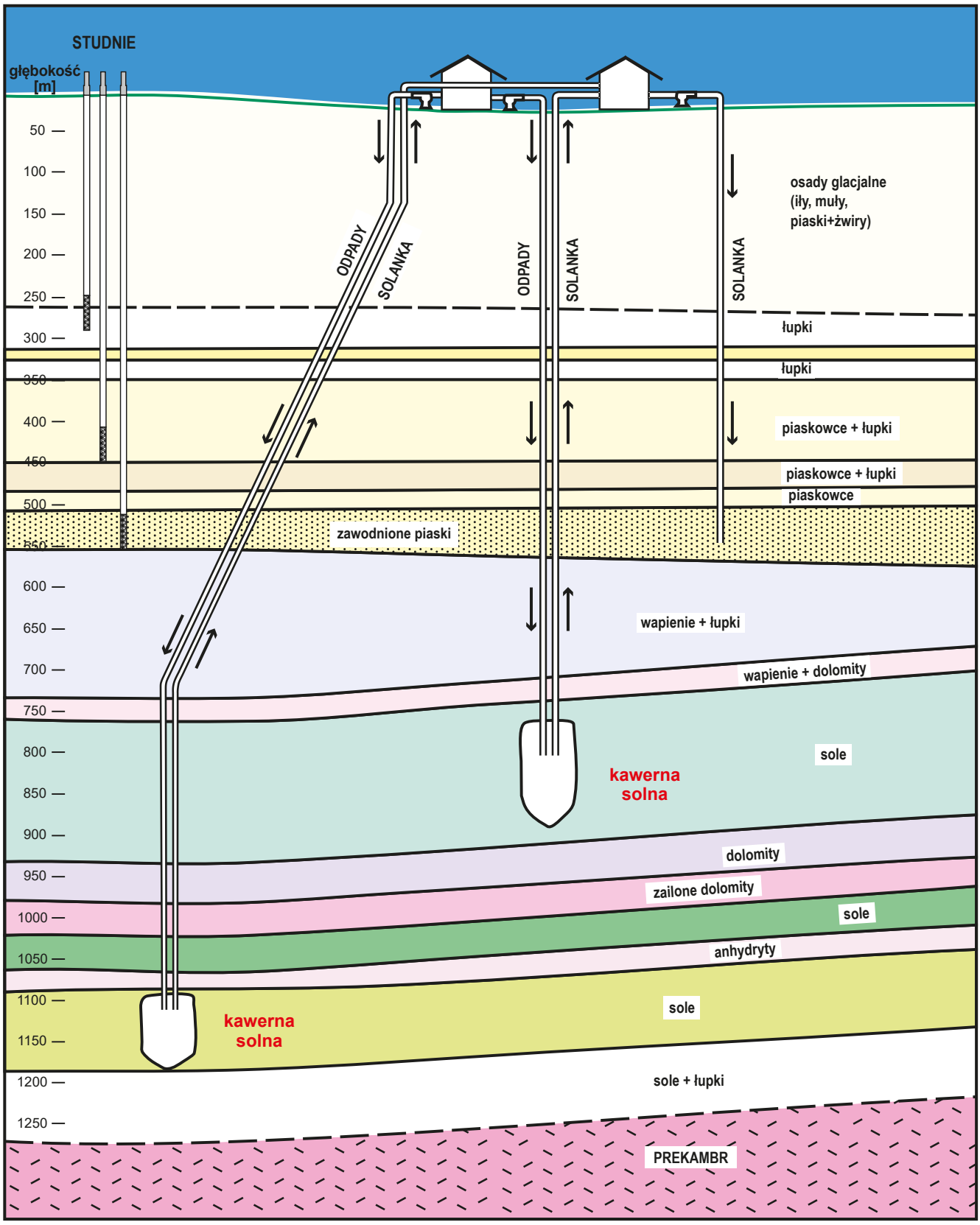
Rys. 37. Lokalizacja komór magazynowych gazu w wysadowych solach cechsztynu w UGS Brandemburg w Niemczech (https://www.vng-gasspeicher.de/en/storage_types; uzupełnione)

W środkowo-wschodnich Chinach w kopalni soli Jintan planuje się budowę magazynu ropy naftowej w komorach solnych ługowanych w pokładowych warstwach soli (Shi i in., 2017). Planowana wysokość komór to 54–70 m, średnica 42,0–52,6 m, objętość 140–190 tys. m^3 oraz głębokość stropu 937–966 m (rys. 38).



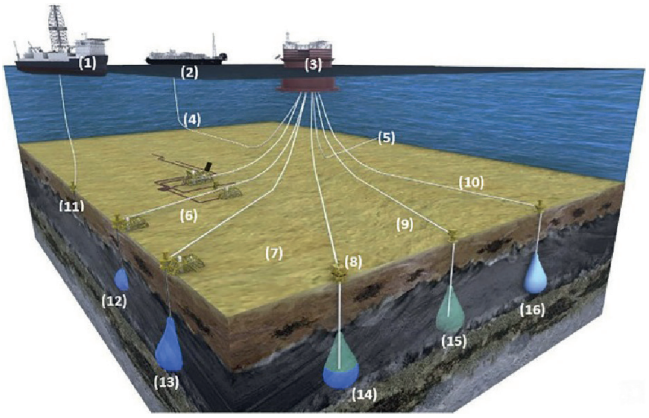
Rys. 38. Szkic lokalizacji planowanych komór magazynowych ropy naftowej (fioletowe) w pokładzie soli kamiennej w kopalni soli Jintan w Chinach (Liu i in., 2020a)

Szczególnym przykładem komór solnych, wykorzystywanych zarówno do magazynowania, jak i składowania, są komory wykonane w pokładach soli kamiennej dewonu dolnego (formacja Lotsberg, maksymalna miąższość ok. 290 m) i środkowego (formacja Prairie, maksymalna miąższość >300 m) w prowincji Alberta w zachodniej Kanadzie (Kukiałka, 2014). W utworach tych (rys. 39) wyługowano 66 komór magazynowych i 25 komór składowiskowych (Kukiałka, 2015). Najlepszym miejscem do wykonania komór są osady formacji Lotsberg, złożone z czystej soli kamiennej z niewielką ilością domieszek (anhydryt, sole potasowo-magnezowe, iłowce), w odróżnieniu od obfitujących w domieszki utworów formacji Prairie. Osady formacji Lotsberg są jednak położone głębiej (ok. 1200 m) (Kukiałka, 2014) niż bardziej miąższe i płyciej zalegające (200–2300 m) sole formacji Prairie. W komorach magazynowych przechowuje się zapasy węglowodorów (gaz ziemny, nieprzetworzoną ropę naftową i skroplony propan). Większość tych jest komór ulokowanych w formacji Lotsberg, średnia ich objętość to 90–150 tys. m^3 (maks. 270 tys. m^3) (Kukiałka, 2015). W komorach składowiskowych umieszcza się odpady z rafinerii, zakładów przeróbki i oczyszczania gazu oraz solankę odpadową.

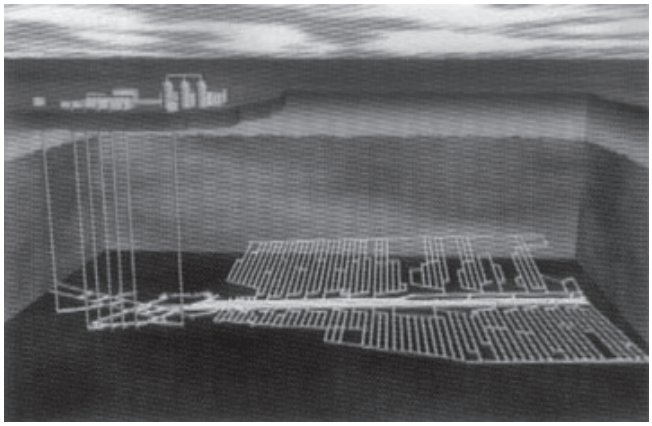


Rys. 39. Magazynowe i składowiskowe komory solne w osadach formacji Prairie i Lotsberg (dewon) w prowincji Alberta, zachodnia Kanada (Kukiałka, 2015, uzupełnione)

Rys. 40. Magazyn wodoru w budowanej kopalni soli, Stany Zjednoczone, Utah (https://fuelcellsworks.com/news/u-s-is-building-salt-mines-to-store-hydrogen)



Rys. 41. Budowa metodą podmorskiego ługowania (1–11) podziemnego składowiska CO_2 w komorach solnych (12–16) w pokładzie soli kamiennej (szary) pod dnem zachodniego Atlantyku u wybrzeży Brazylii (Goulart i in., 2020)



Rys. 42. Podziemny magazyn gazu Háje w Czechach (Ming, 2010)

W komorach solnych lokalizuje się również podziemne magazyny wodoru. Jednym z najstarszych podziemnych magazynów wodoru, działającym od 1983 r., jest cylindryczna komora o średnicy 49 m i wysokości 300 m, ulokowana w wysadzie solnym Clemens w stanie Teksas, Stany Zjednoczone (https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/3-Hevin--Underground-Storage-H2-in-Salt.pdf). W stanie Utah w Stanach Zjednoczonych jest obecnie realizowana budowa podziemnego magazynu wodoru w drążonych komorach solnych (rys. 40). Magazyn jest zlokalizowany w ogromnym złożu soli obejmującym obszar w kształcie pionowego cylindra o średnicy ponad 800 m i wysokości 1600 m. Będzie to jeden z największych magazynów wodoru na świecie oraz ma zasilać energią 150 000 gospodarstw w ciągu roku, przy zapewnieniu mocy magazynu na poziomie 1000 MW.

W komorach solnych można również lokalizować podziemne składowiska odpadów. Takim przykładem może być podziemne składowisko gazu „odpadowego" z produkcji węglowodorów (metan, etan z wysoką zawartością CO_2) planowane do budowy pod dnem Oceanu Atlantyckiego, 300 km od brzegów Brazylii (rys. 41). Składowisko zostanie zlokalizowane w pokładzie soli kamiennej o miąższości 200 m (Da Costa i in., 2020; Goulart i in., 2020), który występuje nad ogromnymi złożami węglowodorów odkrytymi w 2006 r. Ocean Atlantycki, w planowanej lokalizacji komór solnych, ma głębokość ok. 2140 m, a pokład soli kamiennej znajduje się ok. 550 m poniżej powierzchni dna oceanu. Komory solne o wysokości 450 m, średnicy 150 m i objętości ok. 7,5 mln m^3, zostaną wykonane metodą podmorskiego ługowania w odstępach 750 m i będą położone na głębokości 1300 m pod dnem oceanu. Podziemne komory solne mają zapewnić możliwość składowania 4 mld m^3 ww. gazu odpadowego. Zaletą tego projektu jest minimalny konflikt środowiskowy, ponieważ do ługowania komór będzie wykorzystywana woda morska, a zrzut powstałej solanki będzie następował do oceanu.

Na świecie funkcjonuje wiele obiektów podziemnych zlokalizowanych **w komorach skalnych** oraz **w wyrobiskach kopalń podziemnych**. Poniżej podano przykłady podziemnych obiektów typu:

- podziemny magazyn gazu w komorach skalnych bez obudowy;
- podziemny magazyn gazu w komorach skalnych z obudową (LRC);
- podziemny magazyn gazu w wyrobiskach kopalń podziemnych;
- podziemne składowisko odpadów w wyrobiskach kopalń podziemnych.

Największy na świecie magazyn gazu w komorach skalnych bez obudowy rozpoczął działalność w 1998 r. w Háje na terenie Czech (Ming, 2010; https://www.rwe-gasstorage.cz/en/about-us/our-storages/haje) (rys. 42). Magazyn składa się z kilku tuneli bez obudowy o łącznej długości 45 km i przekrojach 12–15 m^2, o pojemności magazynowej 6,2 × 105,0 m^3. Komory są położone na głębokości 955–961 m pod powierzchnią terenu, a zwierciadło wód podziemnych znajduje się 850 m nad komorami. Otaczający górotwór charakteryzuje się wyjątkowo niską przepuszczalnością rzędu 10^{-10}–10^{-12} m/s.

Podziemne magazyny gazu formowane w komorach z obudową (LRC) są najczęściej wykonywane w rejonach, gdzie nie są dostępne naturalne struktury przydatne do magazynowania. Takim przykładem jest Szwecja, na terenie której istnieją demonstracyjne instalacje magazynów gazu w komorach z obudową (LRC) – w Grängesberg (1988) i w Skallen (2002) (Vasquez, Tengborg, 2001). W 2004 r. rozpoczęto budowę kolejnego kompleksu czterech komór z obudową (LRC) w skałach granitowych na głębokości 100–200 m, każda o objętości 40 000 m^3, które zostały wyłożone stalową blachą (Plaat, 2009).

Podziemne magazyny gazu w wyrobiskach kopalń podziemnych funkcjonują np. w:

– kopalni węgla (lignitu) Leyden w hrabstwie Jefferson w Denver w stanie Kolorado o pojemności 70×10^6 Nm^3 przy ciśnieniu 1,8 MPa (Nm^3 – metr sześcienny normalny, rozumiany jako ilość suchego gazu zawarta w objętości 1 m^3 pod ciśnieniem 101,325 kPa i w temperaturze 0°C);
– kopalniach węgla Anderlues i Péronnes w zagłębiu węglowym Hainaut w Belgii (Piessons, Dusar, 2003 za Evans, 2007);
– kopalni wapieni w pobliżu Lawrenceburg w stanie Indiana w Stanach Zjednoczonych (pierwszy na świecie tego typu magazyn) (Plaat, 2009);
– kopalni wapienia w Norton w Stanach Zjednoczonych, ok. 56 km na południe od Cleveland, stan Ohio (magazyn sprężonego powietrza – CAES) (Norton Energy, 2001; Sandia, 2001 za Evans, 2007);
– w kopalniach rud metali w skałach nieosadowych w Norwegii, funkcjonujące jako niskociśnieniowe magazyny sprężonego gazu w wariancie bez obudowy lub w wariancie ze specjalną obudową.

Podziemne składowiska odpadów występują powszechnie na terenie całego świata, także Europy. Podziemne składowisko odpadów niebezpiecznych Minosus (rys. 43), uruchomione w 2005 r., jest założone w wyeksploatowanych polach najstarszej czynnej kopalni soli kamiennej Winsford Mine, eksploatującej złoże na głębokości ok. 220 m (Korzeniowski, Poborska-Młynarska, 2016). Jest to jedyne składowisko tego rodzaju w Anglii. Przewiduje się, że działalność kopalni będzie kontynuowana przez kolejne 50–70 lat.

Podziemne składowisko odpadów i zakład odzysku odpadów Glückauf Sondershausen zostały wybudowane w kopalni Glückauf Sondershausen, która jest najstarszą kopalnią soli potasowych w Niemczech, została uruchomiona w 1896 r. (Marx i in., 2003; https://www.gses.de/untertage-deponie.html). Przechowywane są tu substancje nieorganiczne, stałe i niegazowe. Obszar składowiska jest oddzielony od obszaru podsadzania i tworzy odizolowane pole składowania. Odpady składuje się w opakowaniach: workach big-bag, stalowych beczkach (rys. 44) oraz w kontenerach.

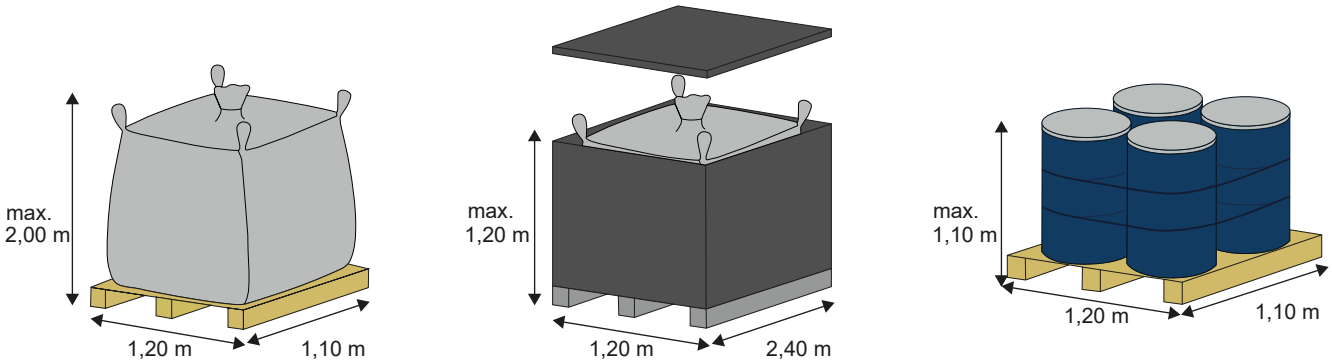
Największym na świecie podziemnym składowiskiem odpadów niebezpiecznych jest Herfa-Neurode (Untertage-Deponie Herfa-Neurode; UTD Herfa-Neurode) założone w Niemczech w 1972 r. w wyrobiskach nieczynnej kopalni soli potasowych (Behnsen, 2008; Schade, 2008). Zlokalizowane jest na głębokości 700 m, a komory pozostałe po komorowo-filarowych systemach eksploatacji tworzą przestrzeń o pojemności milionów metrów sześciennych wykorzystywaną do składowania odpadów (rys. 45). Odpady są zapakowane w wielkie worki, stalowe beczki oraz kontenery (rys. 46) i następnie dostarczane do kopalni koleją lub transportem samochodowym. Materiały sypkie przeznaczone do transportu pneumatycznego dostarcza się w silosach lub cysternach, a te dostarczane luzem są pakowane na miejscu do wielkich toreb.

Rys. 43. Układanie worków z odpadami w składowisku Minosus zlokalizowanym w komorze kopalni soli Winsford, Wielka Brytania (https://www.veolia.co.uk/sites/g/files/dvc1681/files/document/2015/04/Minosus_Brochure_PDF.pdf)

Specjalną formą zagospodarowania odpadów wydobywczych jest ich wykorzystanie jako materiał do likwidacji wyrobisk górniczych. W przypadku wyeksploatowanych komór w kopalniach soli wiele z nich jest wypełnianych w celu zabezpieczenia (tzw. podsadzanie) materiałem odpadowym z produkcji soli i można je traktować jako składowiska odpadów. Przykładem jest podsadzanie przemysłowymi materiałami odpadowymi wyrobisk w kopalni soli Glückauf Sonderhausen w Niemczech (Marx i in., 2000). Już w latach 90. ub. w. sugerowano składowanie odpadów przemysłowych w wyrobiskach poeksploatacyjnych podziemnych kopalń soli w Polsce (np. Radomski, 1994; Garlicki, 1997). Ostatnio analizowano natomiast możliwość zabezpieczenia części wyeksploatowanych wyrobisk podziemnych kopalni w złożu soli kamiennej „Bądzów" przez składowanie odpowiednio

Rys. 44. Beczki z odpadami składowane w komorze solnej w składowisku GSES (https://www.gses.de/untertage-deponie.html)

Rys. 45. Składowanie odpadów z doszczelnianiem komory w składowisku UTD Herfa-Neurode, Reks, Niemcy (https://www.sueddeutsche.de/wissen/untertagedeponie-so-verschwindet-das-gift-unter-der-erde-1.620160; https://www.kpluss.com/en-us/our-business-products/waste-management/)



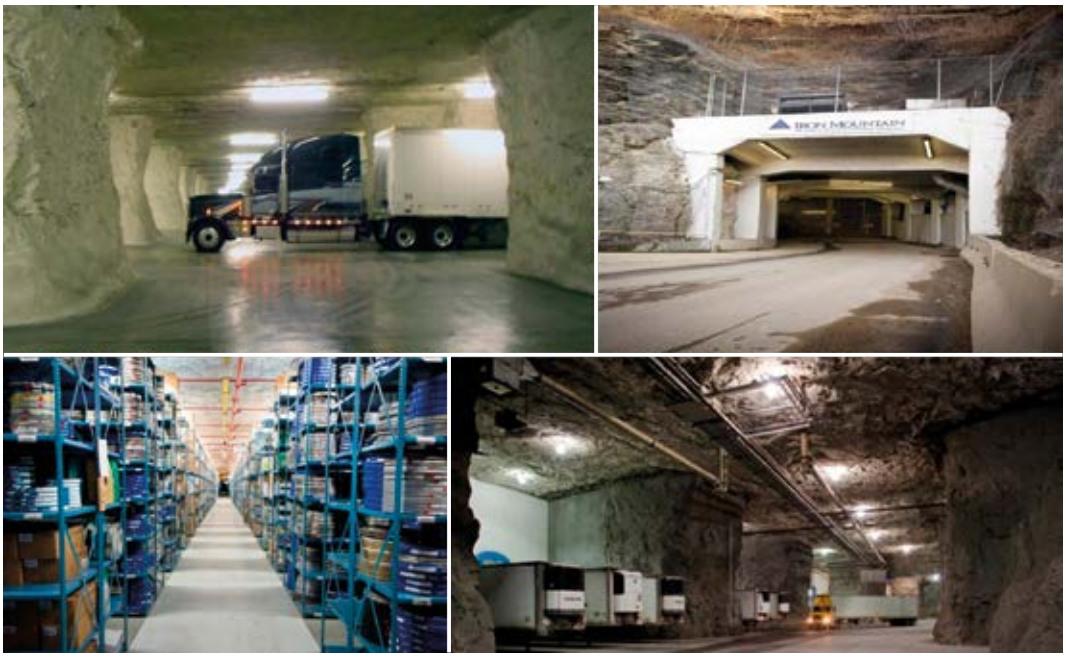
Rys. 46. Przykładowe pojemniki stosowane do pakowania odpadów lokowanych w podziemnej kopalni soli (https://www.kpluss.com/en-us/)

przygotowanych odpadów z przemysłu miedziowego (Dębkowski i in., 2010; Wojnar i in., 2013; Andrusikiewicz i in., 2019).

Szczególną formą magazynowania jest wykorzystanie wyrobisk kopalń podziemnych jako bezpiecznych archiwów. Podziemny magazyn Iron Mountain (rys. 47) został założony w dawnej, płytkiej (67 m) kopalni wapienia w Boyers w Pensylwanii, w pobliżu miasta Butler w Stanach Zjednoczonych. Na łącznej powierzchni ponad 17 ha, w klimatyzowanych pomieszczeniach, przechowuje się cenne dokumentacje archiwalne (również rządowe), taśmy filmowe największych amerykańskich studiów filmowych, nagrania dźwiękowe najbardziej znanych wykonawców oraz studia multimedialne i digitalizacji.

W podziemnym magazynie w komorze solnej w kopalni Hutchinson w stanie Kansas w Stanach Zjednoczonych (rys. 48), zlokalizowanej na głębokości 200 m, na powierzchni ponad 30 ha są przechowywane cenne archiwa i inne rzeczy w warunkach stałej temperatury powietrza, tj. 18–21°C.

Magazyn Sub Tropolis w Missouri, o powierzchni 450 ha z ponad 11 kilometrową siecią dróg, funkcjonuje w podziemnych wyrobiskach kopalni w skałach wapiennych i jest stale powiększany w związku z jej rozwojem (rys. 49).



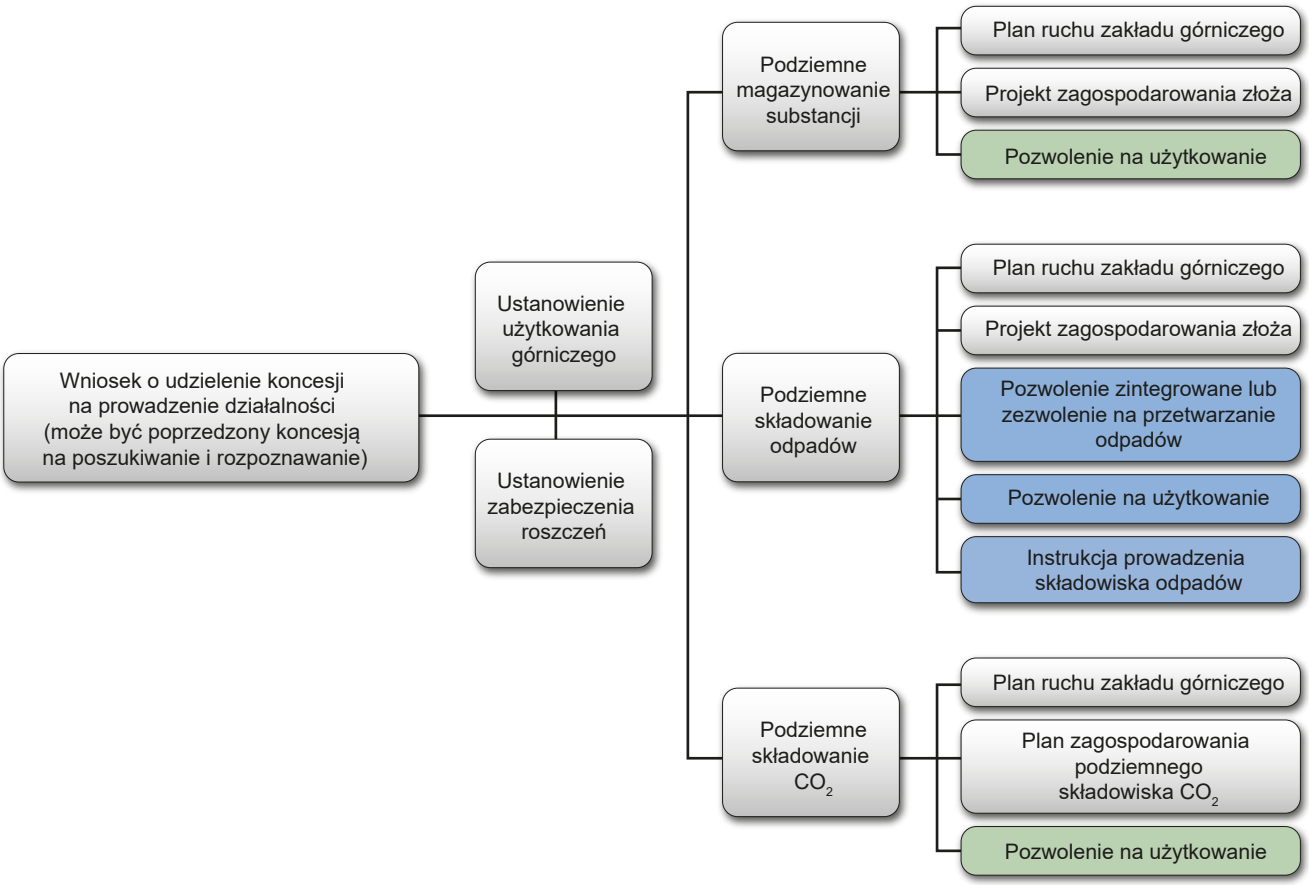
Rys. 47. Podziemny magazyn Iron Mountain w podziemnej kopalni wapienia, Stany Zjednoczone (https://markozen.com/2021/04/17/massive-underground-storage-facility-outside-of-pittsburgh-in-limestone-cave-2/)

Rys. 48. Podziemny magazyn Hutchinson, Stany Zjednoczone (https://www.xtraspace.co.za/blog/articles/five-of-the-worlds-biggest-underground-storage-spaces)

Rys. 49. Magazyn Sub Tropolis w Stanach Zjednoczonych, Missouri, kopalnia wapienia (https://www.xtraspace.co.za/blog/articles/five-of-the-worlds-biggest-underground-storage-spaces)

8. PODSTAWY FORMALNOPRAWNE PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA SUBSTANCJI I PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA ODPADÓW

Rozdział stanowi podsumowanie istotnych zapisów prawnych zawartych w dyrektywach unijnych i przepisach krajowych, związanych z tematyką bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów, które mogą być pomocne w zrozumieniu ścieżki administracyjnej, jaką należy pokonać w procesie realizacji tego typu obiektów oraz przy opracowaniu dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Zagadnienia przedstawione w poradniku są objęte prawodawstwem unijnym i wynikającymi z niego przepisami krajowymi. Regulują je przede wszystkim przepisy ustawy pgg, w której określono zasady i warunki rozpoczęcia, prowadzenia oraz zakończenia tego typu działalności oraz zgodnej z dyrektywami unijnymi ustawy o odpadach. Działalność ta nie może naruszać przeznaczenia nieruchomości określonego w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego (lub – jeżeli brak – w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy) oraz w odrębnych przepisach prawa. Działalność ta wymaga uzyskania koncesji (patrz: rozdz. 8.1) oraz zawarcia umowy o ustanowienie użytkowania górniczego, umożliwiającej posiadaczowi koncesji korzystanie z górotworu, gdyż zgodnie z przepisami prawo własności górniczej należy do Skarbu Państwa. Poniżej (rys. 50) przedstawiono główne etapy proceduralne (tzw. kamienie milowe) prowadzące do uzyskania pozwolenia na użytkowanie obiektu podziemnego, wynikające z ustawy pgg oraz ustawy o odpadach. Uzyskanie koncesji jest kluczowe, dlatego też to zagadnienie opisano w pierwszej kolejności.



Rys. 50. Etapy proceduralne (kamienie milowe) w uzyskaniu pozwolenia na użytkowanie obiektu podziemnego wg ustawy pgg (kolor szary), ustawy o odpadach (kolor niebieski), ustawy Prawo budowlane (kolor zielony)

8.1. ZASADY KONCESJONOWANIA

Zasady udzielania koncesji na prowadzenie działalności objętej poradnikiem dotyczą:

– podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji;
– podziemnego składowania odpadów;
– podziemnego składowania dwutlenku węgla.

W przypadku składowania dwutlenku węgla ustawa pgg przewiduje konieczność uzyskania dodatkowo **koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie** kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, przy czym obszar poszukiwania lub rozpoznawania nie może być większy niż 1200 km^2.

Przepisy dotyczące konieczności uzyskania koncesji na poszukiwanie i rozpoznawanie kompleksu na potrzeby magazynu lub składowiska innego niż składowisko dwutlenku węgla nie do końca są jednoznaczne. Inwestorzy, którzy zaplanowali obiekty w złożach (np. soli) przed koncesją na magazynowanie lub składowanie, pozyskują koncesję na rozpoznawanie lub na poszukiwanie i rozpoznawanie złoża. W projektowanej zmianie do ustawy pgg ma zostać wprowadzony zapis, że w przypadku, gdy tworzeniu wyrobiska górniczego towarzyszy wydobycie kopaliny, wówczas należy uzyskać także koncesję na eksploatację.

Decyzję o udzieleniu koncesji wydaje minister właściwy do spraw środowiska. Uzyskanie tej decyzji jest niezbędnym etapem w procesie realizacji inwestycji polegającej na podziemnym magazynowaniu substancji lub podziemnym składowaniu odpadów lub CO_2.

Koncesji na prowadzenie ww. działalności udziela się na czas oznaczony, nie krótszy niż 3 lata i nie dłuższy niż 50 lat, chyba że przedsiębiorca złożył wniosek o udzielenie koncesji na czas krótszy. Wyjątek stanowi koncesja na podziemne składowanie dwutlenku węgla, w której należy uwzględnić czas na prowadzenie monitoringu po zamknięciu podziemnego składowiska CO_2 przez okres nie krótszy niż 20 lat. Schemat procesu udzielania koncesji na działalność podziemnego, bezzbiornikowego magazynowania lub składowania przedstawiono na rysunku 51.

We wniosku o udzielenie koncesji określa się: właścicieli nieruchomości, prawo do nieruchomości i przestrzeni objętej wnioskiem, środki, jakimi dysponuje wnioskodawca, obszary chronione, sposób przeciwdziałania wpływom na środowisko, nazwę oraz siedzibę firmy wraz numerem KRS, a także rodzaj i zakres zamierzonej działalności z podaniem czasu na jaki koncesja ma być udzielona.

Do wniosku o udzielenie koncesji załącza się:

– informacje wskazane w tabeli 29 w zależności od rodzaju działalności;
– decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach (jeżeli wymagane);
– decyzję zatwierdzającą dokumentację geologiczną (jeżeli została wykonana);
– projekty robót geologicznych (jeżeli przewiduje się wykonywanie robót geologicznych);
– dowody istnienia prawa do korzystania z informacji geologicznej;
– dowód opłaty skarbowej;
– wypis z rejestru gruntów.

We wniosku o udzielenie koncesji wymagane jest załączenie informacji o aktualnych i przewidywanych warunkach geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych, zatem dokumentacja geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna wraz z decyzjami zatwierdzającymi są niezbędnym elementem wniosku koncesyjnego. Opracowanie tych dokumentacji już na tym etapie pozwala pozyskać niezbędne dane do oszacowania kosztów inwestycji oraz wstępnej oceny ewentualnego ryzyka geologicznego, związanego z jej realizacją.

Po złożeniu wniosku do ministra właściwego do spraw środowiska, jest on sprawdzany pod kątem formalnym i przekazywany do zaopiniowania przez wójta, burmistrza lub prezydenta miasta, albo organ administracji morskiej na obszarach morskich RP pod kątem zgodności z miejscowym planem zagospodarowania lub studium. W przypadku udzielenia koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla dodatkowo należy uzyskać opinię Komisji Europejskiej.

Wydanie decyzji o udzieleniu koncesji następuje pod warunkiem:

– zawarcia umowy o ustanowienie użytkowania górniczego (minister przesyła projekt umowy). Decyzja zostaje przekazana do wnioskodawcy, miejscowego organu koncesyjnego, organu nadzoru górniczego, wójta (burmistrza/prezydenta miasta) oraz do Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW), a na obszarach morskich dodatkowo terenowemu organowi administracji morskiej;

Rys. 51. Uproszczony schemat procesu udzielania koncesji na magazynowanie lub składowanie

Tabela 29

Informacje wymagane we wniosku o udzielenie koncesji na bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub składowanie odpadów, lub dwutlenku węgla

Bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub podziemne składowanie odpadów	Podziemne składowanie dwutlenku węgla
Rodzaj, ilość oraz charakterystyka substancji albo odpadów	Ilość oraz charakterystyka, w tym źródło pochodzenia dwutlenku węgla, który będzie zatłaczany do podziemnego składowiska
Aktualne i przewidywane warunki geologiczne, hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie	Aktualne i przewidywane warunki geologiczne, hydrogeologiczne i geologiczno-inżynierskie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla
Technologia magazynowania albo składowania	Technologia składowania i przesyłania dwutlenku węgla oraz lokalizacja instalacji zatłaczającej
Projektowane położenie obszaru górniczego i terenu górniczego, przedstawione zgodnie z wymaganiami dotyczącymi map górniczych, z zaznaczeniem granic podziału terytorialnego kraju	Projektowane położenie obszaru górniczego i terenu górniczego, przedstawione zgodnie z wymaganiami dotyczącymi map górniczych, z zaznaczeniem granic podziału terytorialnego kraju
	Ocena bezpieczeństwa długoterminowego składowania dwutlenku węgla
	Wydajność i ciśnienie zatłaczania dwutlenku węgla
	Wartość ciśnienia granicznego w kompleksie podziemnego składowania dwutlenku węgla
	Proponowana forma i wysokość zabezpieczenia na realizację poszczególnych obowiązków, o których mowa w ustawie pgg w art. 28a ust. 3 i 4, oraz zadań, o których mowa w art. 28e ust. 2.
	Plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla wraz z kopią decyzji o jego zatwierdzeniu
	Oświadczenie wnioskodawcy, że wyraża zgodę na to, że w przypadku przejęcia przez Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla odpowiedzialności za podziemne składowisko dwutlenku węgla, zgodnie z art. 39a ustawy pgg, nastąpi, z mocy prawa, bez odszkodowania, przeniesienie na rzecz Skarbu Państwa prawa do nieruchomości, o której mowa w ust. 4 pkt 4, oraz prawa własności zakładu górniczego

– ustanowienia zabezpieczenia roszczeń mogących powstać wskutek wykonywania takiej działalności (w przypadku składowisk);
– ustanowienia zabezpieczenia roszczeń mogących powstać wskutek wykonywania takiej działalności (w przypadku magazynów) – tylko jeżeli przemawia za tym szczególnie ważny interes państwa lub szczególnie ważny interes publiczny, związany z ochroną środowiska lub gospodarką kraju.

Decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach jest wymagana, jeżeli przedsięwzięcie zostaje zaliczone do inwestycji mogących zawsze negatywnie oddziaływać na środowisko zgodnie z rozporządzeniem w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Rozporządzenie..., 2019). W przypadku gdy przedsięwzięcie zaliczono do inwestycji mogących potencjalnie negatywnie oddziaływać na środowisko, wówczas o konieczności wydania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach decyduje organ ochrony środowiska (w omawianym przykładzie regionalny dyrektor ochrony środowiska).

Organ koncesyjny odmawia udzielenia koncesji, jeżeli wniosek o jej udzielenie obejmuje tę samą przestrzeń oraz rodzaj działalności, co inny wniosek. Odmowa udzielenia koncesji na podziemne składowanie odpadów następuje również, jeżeli istnieje uzasadniona technicznie, ekologicznie lub ekonomicznie możliwość odzysku lub unieszkodliwiania odpadów w inny sposób niż przez ich składowanie.

Należy podkreślić, że rozpoznanie i udokumentowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla w stopniu umożliwiającym sporządzenie planu zagospodarowania jego podziemnego składowiska oraz uzyskanie decyzji zatwierdzającej dokumentację geologiczną (w tym także geologiczno-inżynierską) tego kompleksu uprawnia do wnioskowania o ustanowienie użytkowania górniczego z pierwszeństwem przed innymi. Ustanowienie użytkowania górniczego daje prawo posiadaczowi koncesji do korzystania z przestrzeni w górotworze.

Koncesja określa w szczególności:
– rodzaj i sposób wykonywania zamierzonej działalności;
– przestrzeń, w granicach której ma być wykonywana zamierzona działalność;
– czas obowiązywania koncesji;
– termin rozpoczęcia działalności określonej koncesją, a w razie potrzeby – przesłanki, których spełnienie oznacza rozpoczęcie działalności.

Koncesja wyznacza również **granice obszaru i terenu górniczego**. Podstawą wyznaczenia tych granic dla magazynowania substancji i składowania odpadów jest dokumentacja

geologiczna, zarówno złożowa, jak i geologiczno-inżynierska, a w przypadku składowiska dwutlenku węgla – plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla.

Koncesja może także określać inne wymagania, zwłaszcza dotyczące bezpieczeństwa powszechnego i ochrony środowiska. Pozostałe informacje zawarte w koncesji zależą od rodzaju działalności, a ich zakres jest szczegółowo opisany w ustawie pgg.

Po uzyskaniu koncesji przedsiębiorca przekazuje organowi koncesyjnemu mapy obszaru i terenu górniczego. Następnie organ koncesyjny, po uprawomocnieniu się koncesji, przekazuje do Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB) kopię decyzji o udzieleniu koncesji na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji albo podziemne składowanie odpadów wraz z:

– mapami obszaru górniczego i terenu górniczego;
– kopiami decyzji o zatwierdzeniu dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej oraz dodatków do dokumentacji.

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy dokonuje wpisu do rejestru obszarów górniczych w terminie 14 dni od dnia otrzymania kompletu dokumentów będących podstawą wpisu.

Udokumentowane kompleksy podziemnego składowania dwutlenku węgla, w celu ich ochrony, ujawnia się w studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gmin, miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego oraz planach zagospodarowania przestrzennego województwa. W terminie do dwóch lat od dnia zatwierdzenia dokumentacji geologicznej przez właściwy organ administracji geologicznej obszar udokumentowanego kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla obowiązkowo wprowadza się do studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy.

Zgodnie z warunkami określonymi w ustawie pgg koncesja może zostać zmieniona, ograniczona, przeniesiona lub cofnięta. Nastąpić to może w szczególności w przypadku naruszenia warunków, upadłości przedsiębiorcy lub kiedy jest to związane z bezpieczeństwem państwa czy ochroną środowiska. Koncesja natomiast wygasa w następujących przypadkach: po upływie czasu na jaki została udzielona, kiedy stała się bezprzedmiotowa, jeżeli nastąpiła likwidacja przedsiębiorcy lub przedsiębiorca dokona zrzeczenia się koncesji.

8.2. ZASADY LOKALIZOWANIA, PROJEKTOWANIA, REALIZACJI, EKSPLOATACJI I LIKWIDACJI OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

Ogólne zasady lokalizowania podziemnych składowisk odpadów oraz podziemnych składowisk dwutlenku węgla zawarto w rozdziałach 4 i 4a ustawy pgg. Ustawodawca, w przeciwieństwie do składowisk, dla podziemnych magazynów nie wprowadził zasad lokalizowania, co utrudnia ich wytypowanie. Dla wszystkich obiektów są natomiast podane wymagania dotyczące ich likwidacji (rozdz. 5 ustawy pgg). Najwięcej szczegółowych wymagań ustawodawca przewidział dla podziemnego składowania dwutlenku węgla.

Niezależnie od rodzaju obiektu, podstawą działania obiektu podziemnego są przepisy dotyczące ruchu zakładu górniczego. Szczegółowe wymagania w tym zakresie określono w rozdziale 2 ustawy pgg, rozporządzeniu Ministra Energii w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Rozporządzenie..., 2016) oraz w rozporządzeniach zmieniających (Rozporządzenie Ministra Energii.., 2019; Rozporządzenie Ministra Aktywów Państwowych..., 2020). Dokumentem stanowiącym podstawę do prowadzenia ruchu w zakładzie górniczym jest plan ruchu zakładu górniczego sporządzony zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych. Plan ruchu określa strukturę organizacyjną zakładu, granice obszaru górniczego, a także szczegółowe przedsięwzięcia niezbędne w celu zapewnienia:

– wykonywania działalności objętej koncesją;
– bezpieczeństwa powszechnego;
– bezpieczeństwa pożarowego;
– bezpieczeństwa osób przebywających w zakładzie górniczym (w tym bhp);
– racjonalnej gospodarki górotworem;
– ochrony elementów środowiska;
– ochrony obiektów budowlanych;
– zapobiegania konfliktom interesów (poszukiwanie i rozpoznawanie zasobów naturalnych w obrębie obszaru górniczego lub sąsiednich obszarów górniczych);
– zapobiegania szkodom i ich naprawy.

Plan ruchu sporządza się na okres 2–6 lat, zatwierdza go właściwy organ nadzoru górniczego, co wymaga uprzedniej opinii właściwego wójta (burmistrza/prezydenta miasta) oraz wypełnienia procedury podanej w Ustawie z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (tzw. decyzja środowiskowa), chyba że decyzja środowiskowa została już wydana na wcześniejszych etapach postępowania koncesyjnego. Zmiany planu ruchu są zasadniczo dokonywane w formie dodatku do planu, w takim samym trybie jak zatwierdzenie planu.

Należy wspomnieć, że w przypadku gdy wykonywanie wyrobisk na potrzeby magazynowania lub składowania wymaga wydobycia kopaliny, konieczne jest także opracowanie **projektu zagospodarowania złoża**, niezależnie od rodzaju obiektu, a zgodnie z projektowaną zmianą ustawy pgg – uzyskanie także koncesji na wydobycie. Poniżej opisano wymagania szczególne w zależności od rodzaju obiektu podziemnego (rozdz. 8.2.1, 8.2.2 i 8.2.3).

8.2.1. Podziemne bezzbiornikowe magazyny substancji

Ogólne wymagania dotyczące lokalizowania, projektowania i eksploatacji bezzbiornikowych magazynów substancji można jedynie znaleźć w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie (Rozporządzenie..., 2013), w świetle którego lokalizując instalacje magazynu gazu ziemnego, należy

uwzględnić m.in. warunki geologiczne (par. 105 ust 2). Parametry techniczne podziemnych magazynów w przypadku bezzbiornikowego magazynowania ropy naftowej lub paliw określono w Ustawie z dnia 16 lutego 2007 r. o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym. Więcej szczegółów dotyczących projektowania można znaleźć w zestawie norm Infrastruktura gazowa – Podziemne magazynowanie gazu (PN-EN 1918). Norma zawiera wiele istotnych zaleceń w zakresie projektowania, budowy, badań, rozruchu, eksploatacji, konserwacji oraz wyłączania z eksploatacji podziemnych magazynów gazu, łącznie z głowicą odwiertu. Zalecenia te zebrano w pięciu częściach:

– PN-EN 1918 Część 1: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w warstwach wodonośnych;
– PN-EN 1918 Część 2: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w złożach ropy naftowej i gazu;
– PN-EN 1918 Część 3: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wyługowanych komorach solnych;
– PN-EN 1918 Część 4: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w górniczych kawernach skalnych,
– PN-EN 1918 Część 5: Zalecenia funkcjonalne dotyczące urządzeń powierzchniowych.

Powyższy zestaw norm ma status Polskiej Normy i wyróżnia kilka rodzajów podziemnych magazynów na podstawie struktury oraz mechanizmu składowania (patrz: cz. I, rozdz. 3).

W normach podano ogólną charakterystykę magazynu i charakter jego pracy, scharakteryzowano wymagania dla struktury, ogólne zasady rozpoznania i charakterystyki struktury w zależności od jej typu z uwzględnieniem zasad ochrony środowiska, podstawy projektowania, zasadniczy zakres prac badawczych, a także ogólne wymagania dla projektowania, użytkowania i monitoringu. W normach zawarto również bardzo ogólne wytyczne dotyczące zamknięcia magazynu w zakresie usunięcia substancji magazynowej oraz likwidacji otworów eksploatacyjnych, a także prowadzenie monitoringu po zamknięciu.

Ten dobry przykład nie obejmuje niestety pozostałych rodzajów obiektów podziemnego magazynowania i składowania odpadów i substancji.

8.2.2. Podziemne składowiska odpadów

Zagadnienia dotyczące lokalizowania podziemnego składowania odpadów regulowane są:

– Dyrektywą Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999r. w sprawie składowania odpadów; zmieniona Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z dnia 30 maja 2018 r. (dalej: Dyrektywa z 1999);
– Decyzją Rady 2003/33/WE z dnia 19 grudnia 2002 r. ustanawiająca kryteria i procedury przyjęcia odpadów na składowiska (dalej: Decyzja z 2003) na podstawie art. 16 i Załącznika II do dyrektywy 1999/31/WE;
– Ustawą Prawo geologiczne i górnicze (dalej: pgg) i ustawą o odpadach (Ustawa..., 2012).

Dyrektywa z 1999 r. odnosi się także do zapisów Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy (dalej: Dyrektywa z 2008 z późn. zm.).

Dyrektywa z 1999 definiuje pojęcie podziemnego składowiska odpadów jako stałe miejsce składowania odpadów w głębokiej pustce/kawernie geologicznej (poeksploatacyjnej) takiej jak np. kopalnia soli lub potasu. Wyróżnia trzy typy podziemnych składowisk:

– odpadów niebezpiecznych;
– odpadów innych niż niebezpieczne;
– odpadów obojętnych.

Ustawa pgg (art. 125) określa z kolei następujące typy podziemnych składowisk:

– odpadów niebezpiecznych;
– odpadów obojętnych;
– odpadów promieniotwórczych[30];
– odpadów innych niż niebezpieczne, obojętne i promieniotwórcze.

Dyrektywa z 1999 określa ogólne wymagania w zakresie lokalizacji podziemnych składowisk odpadów. Natomiast Decyzja z 2003 ustala wymagania oceny bezpieczeństwa terenu dla wyznaczonej lokalizacji składowiska, w efekcie której należy wykazać, że nie będzie żadnych, niepożądanych interakcji ze środowiskiem zarówno na etapie eksploatacji obiektu, jak i po jego zamknięciu. Zgodnie z zapisami Decyzji z 2003 ocena bezpieczeństwa terenu powinna wynikać z analizy:

– istniejących zagrożeń wynikających ze składu chemicznego deponowanych odpadów i ich wpływu na poszczególne komponenty środowiska (z uwzględnieniem zachodzących reakcji odpad–otoczenie/biosfera);
– potencjalnych dróg migracji zidentyfikowanych zanieczyszczeń i potencjalnych odbiorców, na których będą miały wpływ zidentyfikowane zanieczyszczenia;
– działań, które mają na celu ograniczenie i wyeliminowanie negatywnego wpływu.

Elementem oceny bezpieczeństwa planowanego obiektu jest ocena ryzyka, która powinna obejmować zarówno fazę eksploatacyjną, jak i poeksploatacyjną. Ocena ryzyka powinna zostać wykonana na podstawie ocen cząstkowych obejmujących analizę warunków geologicznych, hydrogeologicznych, geomechanicznych, geochemicznych oraz wpływu na otaczającą biosferę. Ponadto ocena ta powinna uwzględniać:

– warunki techniczne i górnicze z uwzględnieniem wpływu na środowisko odpadów przeznaczonych do deponowania;
– długoterminowe bezpieczeństwo planowanego obiektu w aspekcie eliminacji zanieczyszczeń środowiska w wyniku ewentualnego uaktywnienia się po latach potencjalnych dróg migracji zanieczyszczeń do biosfery;
– ocenę powierzchniowych urządzeń eksploatacyjnych w aspekcie ich potencjalnego wpływu na środowisko.

[30] Ten typ składowiska nie jest objęty opracowaniem.

Wyniki uzyskane z analizy ocen cząstkowych dla danej lokalizacji składowiska stanowią podstawę do wyznaczenia kryteriów akceptacji odpadów na składowisko oraz określenia środków kontroli w celu ochrony środowiska przed potencjalnym zanieczyszczeniem.

W kwestii umiejscowienia podziemnych składowisk odpadów w ustawie pgg podano ogólne zasady ich lokalizacji, wskazując, że podziemne składowisko odpadów powinno znajdować się w formacji.geologicznej stanowiącej naturalną barierę geologiczną. Bariera ta ma skutecznie izolować odpady od środowiska oraz zapobiegać potencjalnej migracji substancji niebezpiecznych poza granice przestrzeni (wyznaczonej w wyniku przeprowadzonej procedury oceny oddziaływania na środowisko w przypadku odpadów niebezpiecznych) objętej przewidywanymi szkodliwymi wpływami składowanych odpadów. W ustawie pgg jest również zapis, że minister właściwy do spraw środowiska w porozumieniu z ministrem właściwym do spraw klimatu powinien określić, w drodze rozporządzenia, szczegółowe wymagania dla poszczególnych typów podziemnych składowisk odpadów, dotyczące lokalizacji, eksploatacji i zamknięcia, a także zakres, sposób i warunki prowadzenia monitoringu tych składowisk, kierując się potrzebami zapewnienia ochrony środowiska, bezpieczeństwa powszechnego oraz prawidłowego postępowania z odpadami, a także uwzględniając zjawiska przyrodnicze i uwarunkowania geologiczne. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 grudnia 2011 r. w sprawie podziemnych składowisk odpadów, dotyczące ww. aspektów, zostało uchylone w dniu 24 maja 2014 r. bez wprowadzenia aktu obowiązującego.

W obecnej sytuacji należy odnosić się do wymagań Dyrektywy z 1999 r. oraz Decyzji z 2003 r., według których podstawowym warunkiem deponowania odpadów w podziemnych składowiskach jest spełnienie wymagań oceny bezpieczeństwa terenu, opracowanej dla wyznaczonej lokalizacji takiego składowiska i uwzględniającej jego funkcjonowanie w środowisku na przestrzeni kolejnych kilkudziesięciu lat.

Ważnym aspektem branym pod uwagę w trakcie przeprowadzania oceny terenu pod lokalizację składowiska podziemnego każdego typu jest eliminacja z rozważań stref, w których występują zaburzenia tektoniczne oraz strefy aktywne sejsmicznie. Na szczególną uwagę zasługuje natomiast zapewnienie stabilności przestrzeni podziemnych przeznaczonych do deponowania odpadów oraz wypełnionych przestrzeni podziemnych odpadami.

W przypadku podziemnego składowania odpadów zarządzający składowiskiem przed rozpoczęciem działalności polegającej na deponowaniu odpadów w podziemnych składowiskach powinien uzyskać decyzję zatwierdzającą opracowany przez przedsiębiorcę (operatora składowiska) dokument o nazwie „Instrukcja prowadzenia podziemnego składowiska odpadów". Decyzję tę wydaje marszałek właściwy dla miejsca lokalizacji przedsięwzięcia (lub w przypadku terenów zamkniętych – regionalny dyrektor ochrony środowiska). W decyzji tej zawarte są szczegółowe informacje dotyczące funkcjonowania składowiska w fazie eksploatacyjnej i poeksploatacyjnej. Dodatkowo podziemne składowisko odpadów działa na podstawie zatwierdzonego planu ruchu zakładu górniczego.

Natomiast w trakcie prowadzenia działalności zarządzający przed przyjęciem odpadów do składowania powinien ustalić masę odpadów oraz zweryfikować zgodność przyjmowanych odpadów z danymi zawartymi w karcie przekazania odpadów prowadzonej w ramach systemu BDO (lub w dokumentach wymaganych przy międzynarodowym przemieszczaniu odpadów w przypadku, gdy odpady zostały przywiezione do Polski). Jeżeli powyższe wymagania nie zostaną spełnione przez przekazującego odpady, wówczas zarządzający odmawia ich przyjęcia do składowania w podziemnym składowisku oraz ma obowiązek zawiadomić niezwłocznie wojewódzkiego inspektora ochrony środowiska. Prowadzący działalność w zakresie podziemnego składowania odpadów ma w obowiązku zatrudnić w ruchu zakładu górniczego osobę posiadającą świadectwo stwierdzające kwalifikacje w zakresie gospodarowania odpadami (art. 125 ust. 6 ustawy pgg).

8.2.3. Składowiska dwutlenku węgla

Zagadnienia związane z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla określają zapisy dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady[31] z 2009 r. Dyrektywa ma zastosowanie do geologicznego składowania dwutlenku węgla w ilości min. 100 kt i określa środki jakie należy przedsięwziąć w celu ochrony środowiska. Zgodnie z jej zapisami po zamknięciu składowiska i udokumentowaniu jego bezpieczeństwa, odpowiedzialność operatora jest przekazywana władzom krajowym po 20 latach. Odpowiedzialność ta obejmuje monitorowanie, zastosowanie ewentualnych środków naprawczych oraz ewentualne odszkodowania. Wynika to z faktu, że dwutlenek węgla wg obecnej wiedzy będzie deponowany w strukturach geologicznych „na stałe".

Dyrektywa została implementowana do prawa polskiego przez ustawę pgg. Należy podkreślić, że:

- zgodnie z zapisami ustawy podziemne bezzbiornikowe składowanie dwutlenku węgla nie wchodzi w zakres podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji ani podziemnego składowania odpadów;
- ustawa pgg dopuszcza obecnie jedynie przeprowadzenie projektu demonstracyjnego wychwytu i składowania dwutlenku węgla.

W świetle obecnie obowiązującego przepisu ustawy pgg (art. 21 ust. 1a): *Zabrania się wykonywania działalności polegającej na poszukiwaniu lub rozpoznawaniu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla albo na podziemnym składowaniu dwutlenku węgla w celu innym niż przeprowadzenie projektu demonstracyjnego wychwytu i składowania dwutlenku węgla*. Ma to jednak ulec zmianie, gdyż

[31] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG, Euroatom, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.

obecnie procedowana zmiana ustawy pgg usuwa zapisy o projekcie demonstracyjnym (Projekt ustawy pgg z dnia 22 października 2021). Z kolei rozporządzenie wykonawcze (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września..., 2014) wprowadza: *Obszary, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla*. W rzeczywistości, jak dotąd, jest to jeden obszar zlokalizowany na Morzu Bałtyckim (zbiornik kambryjski w wyłącznej strefie ekonomicznej RP po wyeksploatowanych złożach węglowodorów o pow. 1390 km^2).

Ustawa pgg bardzo szczegółowo definiuje jednak zasady lokalizacji kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, który ma być umiejscowiony:

– tam, gdzie prowadzenie takiej działalności nie spowoduje zagrożenia bezpieczeństwa powszechnego, zdrowia i życia ludzi oraz środowiska, jak również konfliktów interesów związanych z wykorzystaniem zasobów naturalnych (art. 127a, ust. 1 i 3);
– na obszarach wskazanych przez ministra właściwego do spraw środowiska w porozumieniu z ministrem właściwym do spraw klimatu w drodze stosownego rozporządzenia (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września..., 2014);
– w górotworze, w obrębie formacji geologicznych spełniających zarówno kryteria dotyczące skał zbiornikowych, jak i skał uszczelniających, stanowiących naturalną barierę geologiczną dla ewentualnego wycieku dwutlenku węgla i jego wydostania się poza kompleks podziemnego składowania, jeżeli z charakterystyki i oceny zawartej w zatwierdzonej dokumentacji geologicznej wynika, że formacje te lub ich części są odpowiednie do podziemnego składowania dwutlenku węgla (art. 127a, ust. 2).

Dodatkowo, zgodnie z zapisami ustawy pgg, w granicach terenu górniczego wyznaczonego w koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla zabrania się prowadzenia innej działalności, która mogłaby zagrażać bezpieczeństwu podziemnego składowiska tego gazu. Dopuszcza się taką możliwość jedynie pod warunkiem, że przedsiębiorca, który zamierza prowadzić również inną działalność, wykaże, że nie będzie ona stanowić zagrożenia dla podziemnego składowiska dwutlenku węgla.

Wiele zagadnień związanych z utrzymywaniem (eksploatacją) podziemnego składowiska dwutlenku węgla zawiera Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla. Zgodnie z ww. rozporządzeniem eksploatację podziemnego składowiska dwutlenku węgla prowadzi się z wykorzystaniem najlepszych dostępnych technik, tzn. możliwych do praktycznego zastosowania i najbardziej efektywnych dla ochrony środowiska. Jednocześnie należy uniemożliwić składowanie w nim innych substancji niż strumień dwutlenku węgla, w szczególności odpadów. Istotne jest także zapewnienie możliwości jego zamknięcia oraz podjęcia działań mających na celu zapobiec szkodzie i ograniczyć dostęp osób nieuprawnionych na teren zakładu górniczego. Przedsiębiorca (operator składowiska) ma za zadanie zapewnić szczelność podziemnego składowiska dwutlenku węgla, tak żeby uniemożliwić wydostanie się gromadzonego gazu poza kompleks, zarówno podczas eksploatacji, jak i po jego zamknięciu. Powinien także odizolować podziemne składowisko dwutlenku węgla od wpływu ewentualnych robót górniczych prowadzonych w górotworze otaczającym omawiany kompleks.

Z powyższymi zagadnieniami wiąże się nałożony na przedsiębiorcę (operatora składowiska) obowiązek gromadzenia i przechowywania informacji o:

– ilości oraz charakterystyce przyjmowanego i zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, jak również wyniki kontroli strumienia dwutlenku węgla (analiza zgodności);
– wydajności zatłaczania strumienia dwutlenku węgla w poszczególnych otworach iniekcyjnych, ciśnienia zatłaczania, maksymalnego ciśnienia dopuszczalnego dla podziemnego składowiska.

Informacje te powinny być przekazane Krajowemu Administratorowi Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (KAPS) w terminie odpowiednio dwóch miesięcy od wygaśnięcia koncesji i sześciu miesięcy od zamknięcia składowiska.

Ustawa pgg definiuje również szczegółowo zawartość **planu zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla** (będącego odpowiednikiem projektu zagospodarowania złoża) oraz zawiera zapisy związane z kwestią zabezpieczeń finansowych należytego wykonywania obowiązków związanych z eksploatacją podziemnego składowiska.

Plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla jest sporządzany na podstawie dokumentacji geologicznej, z uwzględnieniem wymagań w zakresie gospodarowania podziemnym składowiskiem dwutlenku węgla, szczegółowej charakterystyki warunków technicznych i ekonomicznych związanych z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla oraz oceny ryzyka podziemnego składowania dwutlenku węgla.

Plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla podlega zatwierdzeniu, w drodze decyzji, przez właściwy organ nadzoru górniczego. Szczegółowe wymagania jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla reguluje rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. (Rozporządzenie..., 2014). Plan modyfikuje się przez sporządzenie dodatku, w przypadku stwierdzenia istotnych różnic pomiędzy zachowaniem dwutlenku węgla w kompleksie podziemnego składowania a jego prognozowanym zachowaniem oraz przed przystąpieniem do likwidacji zakładu górniczego.

Załącznikami do planu zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zgodnie z ustawą pgg, są:

– **plan monitoringu** – zawiera opis monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla prowadzonego w trakcie funkcjonowania/eksploatacji (w tym przed i w trakcie zatłaczania CO_2), na etapie likwidacji i po zamknięciu składowiska;
– **plan działań naprawczych** – określa działania naprawcze mające na celu uniemożliwienie powstania zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi oraz środowiska, w tym wód podziemnych;

– **tymczasowy plan działań po zamknięciu podziemnego składowiska dwutlenku węgla** – określa m.in. warunki zamknięcia podziemnego składowiska CO_2, charakterystykę szczelności, przewidywane skutki likwidacji, harmonogram i opis przedsięwzięć, które zostaną podjęte po zamknięciu składowiska, w tym środki niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa pracy i bezpieczeństwa powszechnego, ochrony wód podziemnych/środowiska, sposób zabezpieczenia obiektów, opis działań wykonywanych po likwidacji zakładu górniczego, niezbędnych do przekazania KAPS itp.

8.3. ZASADY KONTROLOWANIA I MONITOROWANIA OBIEKTÓW

Dokumentacja geologiczno-inżynierska określa zalecenia dla prowadzenia monitoringu obiektów podziemnych, co wynika z rozporządzenia w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016). Zalecenia te powinny dotyczyć prowadzenia monitoringu projektowanej inwestycji na etapie przed eksploatacją i w trakcie eksploatacji oraz wstępne zalecenia dotyczące etapu jej likwidacji i po jej zakończeniu. W ustawie pgg szczegółowe wymagania dla planu monitoringu jakie należy określić już na etapie wniosku koncesyjnego dotyczą wyłącznie składowiska CO_2. W przypadku magazynowania substancji i składowania odpadów zapisy dotyczące monitoringu przewijają się w aktach prawnych dotyczących planów ruchu zakładu górniczego. Wymagania dotyczące monitoringu rozpatrywanych magazynów i składowisk są tam podane w sposób ogólnikowy.

Monitoring **obiektu podziemnego** wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 28 grudnia 2011 r. w sprawie podziemnych składowisk odpadów (uznane za uchylone) prowadzi się w trzech fazach:

– przedeksploatacyjnej – obejmujące okres do uzyskania koncesji na podziemne składowanie odpadów;
– eksploatacyjnej – obejmujące okres od dnia uzyskania koncesji na podziemne składowanie odpadów do dnia uzyskania decyzji o jej cofnięciu lub wygaśnięciu;
– poeksploatacyjnej – obejmujące okres nie krótszy niż 30 lat, licząc od dnia uzyskania decyzji o wygaśnięciu lub cofnięciu koncesji na podziemne składowanie odpadów.

Monitoring w fazie przedeksploatacyjnej prowadzi się w zakresie niezbędnym do sporządzenia dokumentacji hydrogeologicznej oraz geologiczno-inżynierskiej w związku z podziemnym składowaniem odpadów. Przeprowadza się go w celu określenia pierwotnego stanu środowiska (stan zerowy, kartowanie geochemiczne) oraz wyznaczenia zakresu, sposobu i warunków prowadzenia monitoringu dla fazy eksploatacyjnej. Monitoring w fazie przedeksploatacyjnej polega w szczególności na:

– określeniu warunków, charakteryzujących wybrane formacje geologiczne w związku z podziemnym składowaniem określonych grup odpadów;
– określeniu substancji i parametrów wskaźnikowych oraz częstotliwości pobierania próbek wód powierzchniowych, podziemnych i pochodzących z odwodnienia wyrobisk górniczych oraz zużytego powietrza odprowadzanego z podziemnego składowiska odpadów;
– lokalizacji otworów obserwacyjnych oraz innych punktów pomiarowych do prowadzenia monitoringu w fazie eksploatacyjnej; ich liczba nie może być mniejsza niż trzy, przy czym jeden otwór lokalizuje się na dopływie wód podziemnych do obiektu, a dwa – na ich odpływie.

W zapisach dotyczących **magazynowania węglowodorów** podano, że przed przystąpieniem do zatłaczania węglowodorów do podziemnego magazynu węglowodorów są wymagane pomiary pierwotnego tła gazowego w powietrzu glebowym na obszarze magazynu oraz zbadanie szczelności odwiertów udostępniających podziemny magazyn. Niezbędne jest również zbadanie szczelności magazynu w wykonanych na jego obszarze otworach wiertniczych w celu kontroli zjawisk zachodzących w złożu stanowiącym magazyn (to ostatnie zapewne także w trakcie eksploatacji magazynu).

Monitoring w fazie eksploatacyjnej prowadzi się zgodnie z warunkami ustalonymi w dokumentacji hydrogeologicznej i geologiczno-inżynierskiej, przygotowanej w związku z podziemnym składowaniem odpadów, zgodnie z zakresem i sposobem określonym w koncesji na podziemne składowanie odpadów, wykorzystując otwory obserwacyjne i punkty pomiarowe. Polega on na:

– badaniu substancji i parametrów wskaźnikowych;
– kontroli warunków panujących w górotworze, w tym: konwergencji, wielkości dopływów wód podziemnych do wyrobisk górniczych, poziomu metanonośności oraz innych wymagań zgodnie z zakresem i sposobem monitorowania składowiska określonymi w koncesji na podziemne składowanie odpadów.

W przypadku magazynowania węglowodorów w planie ruchu niezbędne jest także podanie m.in. zasad prowadzenia pomiarów i obserwacji wpływów magazynowania/składowania na środowisko i warunki hydrogeologiczne w rejonie magazynu lub składowiska oraz na terenie górniczym lub wymagań w odniesieniu do obserwacji i pomiarów wpływu robót górniczych na powierzchnię oraz zmian stosunków wodnych i tła gazowego w powietrzu glebowym. Zakres obserwacji i pomiarów oraz ich częstotliwość powinny umożliwić określenie (zasięgu i wielkości) wpływu eksploatacji oraz ocenę stanu zagrożenia obiektów budowlanych i urządzeń, a także ich otoczenia (wyniki są zestawiane na mapach specjalnych terenu górniczego).

Zakres, sposób i warunki prowadzenia monitoringu podziemnego składowiska odpadów w fazie poeksploatacyjnej ustala się na podstawie wyników monitoringu przeprowadzonego w fazie eksploatacyjnej. Polega on na:

– badaniu substancji i parametrów wskaźnikowych wód podziemnych;
– kontroli warunków panujących w górotworze, w tym konwergencji, kontroli geochemicznej powietrza glebowego w rejonie zlikwidowanych wyrobisk górniczych, pionowych, wyrobisk górniczych o nachyleniu powyżej 45° oraz odwiertów.

Monitoring fazy poeksploatacyjnej wydłuża się w przypadku stwierdzenia migracji substancji niebezpiecznych

pochodzących ze składowanych odpadów poza granice przestrzeni objętej przewidywanymi szkodliwymi wpływami podziemnego składowania odpadów. Wtedy monitoring prowadzi się przez 10 lat od ustania negatywnego oddziaływania na środowisko, a zakres, sposób i warunki prowadzenia dostosowuje się do sytuacji.

Częstotliwość pomiarów nie powinna być mniejsza niż raz na sześć miesięcy, a badania substancji i parametrów wskaźnikowych należy prowadzić w laboratoriach badawczych z wdrożonym systemem jakości w rozumieniu przepisów o normalizacji.

Monitoringu w fazie poeksploatacyjnej nie prowadzi się w odniesieniu do podziemnego składowiska odpadów niebezpiecznych, na którym są składowane wyłącznie odpady niebezpieczne pochodzące z budowy, remontu i rozbiórki obiektów budowlanych czy infrastruktury drogowej oraz do podziemnego składowiska odpadów obojętnych.

Monitoring kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla prowadzi się z wykorzystaniem odwiertów iniekcyjnych, otworów obserwacyjnych, punktów badawczych i innych punktów pomiarowych, zgodnie z ww. planem monitoringu oraz koncesją na składowanie, z uwzględnieniem najlepszych dostępnych technik. Badania i kontrole wymagane w planie monitoringu, jak opisano powyżej, obejmują w szczególności badanie substancji i parametrów wskaźnikowych celem ewentualnego stwierdzenia wycieków dwutlenku węgla poza kompleks składowania lub innych nieprawidłowości wpływających negatywnie na środowisko.

W przypadku **podziemnego składowiska dwutlenku węgla** plan monitoringu jest wymaganym załącznikiem do planu zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla, tj. niezbędny na etapie wniosku koncesyjnego.

Plan monitoringu powinien zawierać opis stałej obserwacji kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla prowadzonej w trakcie funkcjonowania (bezpośrednio przed i w trakcie zatłaczania dwutlenku węgla), na etapie likwidacji oraz po zamknięciu składowiska i przekazaniu KAPS odpowiedzialności za składowisko. Plan taki powinien zawierać:

- opis monitorowanych parametrów oraz wskazanie technik i technologii ich pomiaru;
- opis znaczenia poszczególnych parametrów dla oceny procesu składowania CO_2 oraz związane z tym możliwe nieprawidłowości, ryzyka i zagrożenia;
- opis i lokalizację (mapa górnicza) otworów obserwacyjnych, punktów pomiarowych i punktów poboru próbek;
- zakres badań laboratoryjnych;
- określenie parametrów wskaźnikowych istotnych dla oceny procesu składowania, w tym wartości ciśnień złożowych decydujących o bezpieczeństwie składowania;
- częstotliwość pomiarów i opróbowania monitorowanych parametrów;
- harmonogram prowadzenia badań i pomiarów;
- opis zastosowanej technologii monitorowania i uzasadnienie jej wyboru, z uwzględnieniem najlepszych dostępnych technik (do wykrywania możliwych nieprawidłowości, ryzyka i zagrożeń);
- sposób dokonania oceny i omówienie metod, które zostaną zastosowane w celu porównania stanu środowiska z jego stanem pierwotnym i modelowym oraz wykrywania możliwych nieprawidłowości, ryzyka i zagrożeń (wpływ na użytkowe poziomy wód podziemnych, a także na bezpieczeństwo zdrowia i życia ludzi oraz środowiska), jak również oceny podjętych działań naprawczych i bezpieczeństwa składowania w perspektywie dziesiątek i tysięcy lat.

Plan ten powinien zawierać opis planowanych ciągłych lub cyklicznych badań i kontroli dla następujących monitorowanych parametrów:

- składu chemicznego odbieranego i zatłaczanego strumienia CO_2 oraz zatłoczonej substancji;
- przepływu objętościowego (na głowicy otworu iniekcyjnego), wydajności zatłaczania, masy i masowego natężenia przepływu oraz ciśnienia i temperatury zatłaczanego strumienia CO_2;
- temperatury i ciśnienia w kompleksie podziemnego składowania, w tym w składowisku CO_2;
- jakości, ciśnienia i temperatury wód podziemnych w poziomach wodonośnych ponad kompleksem podziemnego składowania;
- składu powietrza glebowego (w tym składu izotopowego dwutlenku węgla);
- szczelności odwiertów iniekcyjnych i obserwacyjnych;
- emisji dwutlenku węgla z kompleksu podziemnego składowania/składowiska dwutlenku węgla (zgodnie z dyrektywą unijną 2003/87/WE) oraz ich oddziaływania na środowisko.

Ponadto w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla podano szczegółowe wymagania odnośnie do sposobu, częstotliwości i warunków prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania tego gazu.

Częstotliwość i zakres monitoringu kompleksu podziemnego składowania CO_2 ustala się tak, żeby zrealizować cele monitoringu. Pobór próbek zatłaczanego i składowanego strumienia dwutlenku węgla w etapie eksploatacji podziemnego składowiska prowadzi się w sposób ciągły lub cyklicznie, nie rzadziej niż co sześć miesięcy. Natomiast bazując na powierzchniowych badaniach sejsmicznych (oraz ewentualnie innych badaniach geofizycznych) dokonuje się porównywania rzeczywistego zachowania składowanego dwutlenku węgla w podziemnym składowisku z zachowaniem prognozowanym, w szczególności w przypadku stwierdzenia znaczących różnic pomiędzy rzeczywistym a prognozowanym zachowaniem, jednak nie rzadziej niż co pięć lat.

Na etapie po zamknięciu podziemnego składowiska dwutlenku węgla do chwili przekazania KAPS odpowiedzialności za to składowisko prowadzi się monitoring kompleksu poziemnego składowania CO_2 na podstawie wyników monitoringu etapu funkcjonowania (eksploatacji) składowiska, a po przekazaniu odpowiedzialności KAPS – na podstawie wyników etapów poprzednich. W ramach monitoringu po

zamknięciu składowiska prowadzi się w szczególności kontrolę warunków panujących w kompleksie podziemnego składowania, w tym jakości wód podziemnych ponad kompleksem (uszczelnieniem) oraz kontrolę geochemiczną powietrza glebowego w rejonie otworów zlokalizowanych w obrębie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, zarówno czynnych, jak i zlikwidowanych.

Po przekazaniu odpowiedzialności KAPS można ograniczyć częstotliwość i zakres prowadzonego monitoringu w sposób pozwalający na wykrycie wycieków dwutlenku węgla poza kompleks składowania lub innych nieprawidłowości, które wiążą się z ryzykiem wystąpienia wycieku dwutlenku węgla lub powstaniem zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi oraz środowiska. W przypadku wystąpienia takich zdarzeń należy zwiększyć częstotliwość i zakres prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania celem ustalenia ich rozmiaru oraz podjęcia działań naprawczych, a następnie oceny ich skuteczności.

Brak jest polskich doświadczeń związanych z monitoringiem składowiska CO_2, poza projektem badawczym w Kaniowie (w ramach unijnych projektów RECOPOL i MOVECBM) i monitoringiem zatłaczania niewielkich ilości gazu kwaśnego (zawierającego ok. 80% CO_2) na złożu gazu Borzęcin.

8.4. SUBSTANCJE I ODPADY PRZEZNACZONE DO PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA LUB PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA

W rozdziale zestawiono substancje i odpady, które można rozpatrywać w kontekście umieszczania ich w górotworze oraz przedstawiono ich krótką charakterystykę. Należy podkreślić, że szczegółowe kryteria i procedury przyjęcia odpadów do deponowania w podziemnych składowiskach (na podstawie art. 16 i zał. II Dyrektywy z 1999) określono w Decyzji z 2003. Nie ma natomiast takich wymagań dla substancji.

Wykaz odpadów, które zostały wyłączone z procesu deponowania w podziemnych składowiskach zawiera art. 5 ust. 3[32] Dyrektywy z 1999 oraz pkt. 2.1 Dodatku A Decyzji z 2003[33]. Ogólnie wyłączenia dotyczą tych grup i/lub rodzajów odpadów, które:

- mogą ulec niepożądanym przemianom fizycznym, chemicznym i/lub biologicznym po umieszczeniu ich na składowisku, np. mogą reagować z wodą lub skałą macierzystą (co może powodować powstawanie samozapalnych czy toksycznych substancji lub gazów);
- mogą wytwarzać mieszankę gazowo-powietrzną, która jest toksyczna lub wybuchowa;
- mogą wytwarzać chorobotwórcze zarazki chorób zakaźnych (odpady medyczne i weterynaryjne zakaźne);
- stanowią odpady ulegające biodegradacji lub charakteryzujące się niewystarczającą stabilnością w odniesieniu do warunków geomechanicznych.

Pozostałe grupy/rodzaje odpadów niesklasyfikowane do ww. odpadów mogą być deponowane w podziemnych składowiskach odpadów pod warunkiem spełnienia wyznaczonych dla nich kryteriów (wg wyników analiz ocen cząstkowych), a przede wszystkim, jeżeli jest to zgodne z opracowaną oceną bezpieczeństwa dla terenu podziemnego składowiska.

Procedura dopuszczenia odpadów do podziemnego składowania obejmuje, oprócz zgodności tego procesu z opracowaną dla wybranej lokalizacji oceną bezpieczeństwa terenu, również spełnienie kryteriów dla poszczególnych typów składowisk zawartych w sekcji 2.1 Decyzji z 2003 dla składowisk odpadów obojętnych oraz w sekcji 2.2 i 2.3 tej decyzji dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne. Dla podziemnych składowisk odpadów niebezpiecznych, oprócz zgodności tego procesu z oceną bezpieczeństwa terenu, procedura ich przyjęcia na składowisko obejmuje (ustawa o odpadach z 2012):

- opracowanie podstawowej charakterystyki odpadów przez posiadacza lub wytwórcę odpadów (w tym przeprowadzenie badań wymywalności oraz składu

[32] Zgodnie z art. 5 ust. 3 Dyrektywy z 1999 są to:
- odpady płynne;
- odpady, które w warunkach panujących na składowisku mogą stać się wybuchowe, zagrożone korozją lub utlenianiem, wysoce łatwopalne lub palne zgodnie z zał. III do dyrektywy 2008/98/WE z późn. zm.;
- odpady medyczne i weterynaryjne o charakterze zakaźnym zgodnie z definicją (właściwość H9 w zał. III) zawartą w dyrektywie 2008/98/WE z późn. zm. pochodzące ze szpitali i placówek medycznych lub weterynaryjnych;
- całe i pocięte zużyte opony;
- każdy inny rodzaj odpadów, które nie spełniają kryteriów przyjęcia określonych zgodnie z zał. II dyrektywy 1999/31/WE z późn. zm.;
- odpady selektywnie zebrane w celu przygotowania do ponownego użycia lub recyklingu zgodnie z art. 11 ust. 1 i art. 22 dyrektywy 2008/98/WE, z wyjątkiem odpadów powstających w wyniku operacji dalszego przetwarzania selektywnie zebranych odpadów, jeżeli składowanie daje w tym przypadku wynik najlepszy dla środowiska zgodnie z art. 4 tej dyrektywy.

[33] Zgodnie z pkt 2.1.Dodatku A do Decyzji z 2003 są to:
- odpady i ich pojemniki, które mogą reagować z wodą lub ze skałą macierzystą w warunkach składowania, co powoduje:
  - zmiany objętościowe,
  - wytwarzanie samozapalnych, toksycznych lub wybuchowych substancji lub gazów,
  - wszelkie inne reakcje, które mogą zagrozić bezpieczeństwu operacyjnemu lub spójności bariery;
- odpady ulegające biodegradacji;
- odpady o ostrym zapachu;
- odpady, które mogą wytwarzać mieszankę gazowo-powietrzną, która jest toksyczna lub wybuchowa;
- odpady o niewystarczającej stabilności w odniesieniu do warunków geomechanicznych;
- odpady, które są samozapalne lub wykazują tendencję do samoczynnego zapłonu w warunkach składowania, produkty gazowe, odpady lotne, odpady gromadzone w postaci niezidentyfikowanych mieszanin;
- odpady, które zawierają, lub mogą wytwarzać, chorobotwórcze zarazki chorób zakaźnych (przewidziane art. 5 ust. 3 lit. c) Dyrektywy z 1999.

chemicznego)[34] i przekazanie podstawowej charakterystyki odpadów prowadzącemu podziemne składowisko odpadów;
– przeprowadzenie kontroli zgodności dostarczonych odpadów do składowania, w celu weryfikacji informacji zawartych w podstawowej charakterystyce odpadów (raz do roku);
– weryfikację dostarczonych do deponowania odpadów na miejscu ich składowania (weryfikacja dokumentów oraz dostarczonego ładunku, wykonanie okresowych testów zgodności).

W tym przypadku nie obowiązują kryteria zawarte w sekcji 2.4 Decyzji z 2003 dla składowisk odpadów niebezpiecznych.

W prawodawstwie krajowym dopuszcza się możliwość deponowania odpadów w podziemnych składowiskach. Aspekty podziemnego składowania odpadów w Polsce regulują ustawa pgg wraz z rozporządzeniami oraz ustawa o odpadach (Ustawa..., 2012).

Zgodnie z pgg składowanie odpadów powinno odbywać się przede wszystkim w sposób selektywny. Nieselektywnie można deponować odpady tylko pod warunkiem, że nie spowoduje to zagrożenia środowiska lub nie naruszy wymagań bezpieczeństwa określonych dla stabilności procesu składowania. Ponadto, co istotne, nie można rozcieńczać odpadów lub sporządzać ich mieszanin ze sobą lub z innymi substancjami (przedmiotami), aby spełnić kryteria dopuszczenia do podziemnego składowania. Z procesu składowania w podziemnych składowiskach (art. 126 ustawy pgg) wyłączone są konkretne rodzaje odpadów oraz ich mieszaniny z uwagi na m.in. właściwości fizyczno-chemiczne (z wyjątkiem odpadów obojętnych oraz innych niż niebezpieczne i obojętne, jeżeli stanowią odpady wydobywcze w rozumieniu ustawy o odpadach wydobywczych – Ustawa..., 2008).

Natomiast zagadnienia składowania odpadów w podziemnych wyrobiskach (zakładach górniczych) regulowane są:
– ustawą o odpadach wydobywczych (Ustawa..., 2008);
– ustawą Prawo geologiczne i górnicze wraz z rozporządzeniami (ustawa pgg);
– ustawą o odpadach (Ustawa..., 2012).

Ustawa o odpadach wydobywczych reguluje ogólne kwestie stosowania odpadów wydobywczych do wypełniania wyrobisk górniczych. Realizując działania w tym zakresie, należy spełnić następujące warunki (art. 39, ust.1 ww. ustawy):
– zabezpieczyć stabilność odpadów wydobywczych;
– zapobiegać zanieczyszczeniu gleby, wód powierzchniowych i podziemnych;
– zapewnić monitoring wyrobisk górniczych wypełnionych odpadami wydobywczymi.

Sposób postępowania z odpadami w zakładach górniczych uzależniony jest od pochodzenia odpadów (tj. miejsca wytworzenia). W przypadku stosowania własnych odpadów (wytworzonych w tym samym zakładzie, w którym będą wykorzystane do wypełniania wyrobisk) działania w tym zakresie będą podlegały tylko przepisom ustawy pgg. Natomiast, gdy stosowane odpady wydobywcze zostały wytworzone w innym zakładzie górniczym niż ten, w którym będą poddawane procesom odzysku w wyrobiskach, wówczas mają zastosowanie przepisy ustawy o odpadach oraz przepisy ustawy pgg.

W podziemnych wyrobiskach górniczych, w procesie odzysku (R5 Recykling lub odzysk innych materiałów nieorganicznych), mogą być wykorzystywane wyłącznie rodzaje odpadów wyszczególnione w pkt 3 zał. do rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Rozporządzenie..., 2015). W grupie tych odpadów mogą się znajdować zarówno odpady wydobywcze, jak i masy ziemne lub skalne powstające w wyniku prowadzenia eksploatacji kopalin (§ 130 ust. 2 w rozporządzeniu Ministra Energii w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych[35]). Odpady te mogą być stosowane w technikach górniczych:
– jako składnik podsadzki hydraulicznej i samozestalającej;
– do doszczelniania zrobów;
– do profilaktyki przeciwpożarowej i budowy korków izolacyjnych;
– do likwidacji zbędnych wyrobisk, w tym szybów;
– do wzmocnień i stabilizacji wyrobisk górniczych,

pod warunkiem prowadzenia tej działalności, z uwzględnieniem właściwości odpadów oraz warunków lokalnych, w taki sposób, żeby działalność ta nie powodowała pogorszenia jakości wód podziemnych.

Przed zastosowaniem odpadów w technikach górniczych niezbędne jest opracowanie dokumentacji, która jest zatwierdzana przez kierownika ruchu zakładu górniczego. Zakres informacji, jakie powinna zawierać dokumentacja, został określony w § 132 ust. 2 rozporządzenia Ministra Energii w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych i obejmuje:
– opinię zespołu do rozpoznawania i zwalczania zagrożeń występujących w ruchu zakładu górniczego;
– ocenę rodzaju użytego odpadu pod względem higieniczno-toksykologicznym;
– technologię wykorzystania odpadów.

[34] Badań nie przeprowadza się dla:
– odpadów z materiałów włókna szklanego (wyłącznie bez spoiwa włókna szklanego);
– szkła (zbieranego selektywnie) i opakowań ze szkła;
– odpadów betonu, gruzu betonowego i ceglanego, materiałów ceramicznych oraz zmieszanych odpadów gruzu betonowego i materiałów ceramicznych, które nie zawierają substancji niebezpiecznych;
– gleby (niezawierającej warstwy uprawnej oraz torfu) i kamieni niepochodzących z miejsc skażonych substancjami niebezpiecznymi.

[35] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 1118) zmienione przez: Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 22 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2019 poz. 1880) oraz Rozporządzenie Ministra Aktywów Państwowych z dnia 19 czerwca 2020 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2020 poz. 1094).

W ramach ostatniego punktu, w dokumentacji powinny być zawarte informacje dotyczące:
- sposobu wytwarzania mieszaniny wraz z opisem urządzeń stosowanych do wytwarzania i transportu mieszaniny;
- właściwości fizyczno-chemiczne stosowanych mieszanin;
- procedury kontroli całego procesu;
- postępowania w przypadku awarii;
- mapy wyrobisk górniczych i przekrojów hydrogeologicznych.

W celu kontroli jakości środowiska wodnego w rejonie stosowanych odpadów wykonuje się badania jakości wód podziemnych oraz wykorzystywanych odpadów (z uwzględnieniem ich właściwości i warunków lokalnych). Zakres i częstotliwość badań określa kierownik ruchu zakładu górniczego.

Wymagania jakie powinny spełniać odpady przeznaczone do podziemnego składowania określono w art. 126 ustawy pgg. Zgodnie z tymi wymaganiami z podziemnego składowania wyłączone są:
- odpady występujące w postaci ciekłej, w tym odpady zawierające wodę w ilości powyżej 95% masy całkowitej, z wyłączeniem szlamów;
- odpady o właściwościach wybuchowych, żrących, utleniających, wysoce łatwopalnych lub łatwopalnych;
- odpady zakaźne medyczne i zakaźne weterynaryjne;
- odpady powstające w wyniku prac naukowo-badawczych, rozwojowych lub działalności dydaktycznej, które nie są zidentyfikowane lub są niesklasyfikowane i których oddziaływanie na środowisko nie jest znane;
- opony, z wyłączeniem opon rowerowych i opon o średnicy zewnętrznej większej niż 1400 mm.

Ponadto wyłączone są również te rodzaje odpadów, które w warunkach podziemnego składowania mogą podlegać niepożądanym zmianom fizycznym, chemicznym lub biologicznym (biodegradacji).

Do grupy odpadów podlegających niepożądanym zmianom zaliczono:
- odpady, które mogą wchodzić w reakcje z wodą lub skałą macierzystą, prowadząc do zmiany ich objętości;
- odpady o ostrym zapachu;
- odpady mogące wytwarzać mieszanki gazowo-powietrzne o właściwościach toksycznych lub wybuchowych;
- odpady samozapalne lub podatne na samozapłon w danych warunkach składowania;
- odpady będące produktami gazowymi;
- odpady lotne oraz pochodzące ze zbierania w postaci nieokreślonych mieszanin;
- odpady nieodpowiadające warunkom geomechanicznym ze względu na niewystarczającą stabilność.

W niepożądane reakcje (odpad–opakowanie) mogą także wchodzić pojemniki, w których nagromadzono odpady charakteryzujące się powyższymi właściwościami.

Z doświadczeń niemieckich (Barchański, 2003; Baart, Lukas, 2010), angielskich (https://www.veolia.co.uk/) oraz francuskich (https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr) wynika, że w podziemnych składowiskach (zorganizowanych w wyrobiskach poeksploatacyjnych – kawernach kopalń soli) deponowano stałe odpady niebezpieczne. Najczęściej były to odpady z oczyszczania spalin z komunalnych i przemysłowych instalacji termicznego przekształcania (popioły lotne, pyły z odpylania, placki filtracyjne), ale również odpady zawierające m.in.: rtęć, cyjanki, chrom (np. odpady z procesów galwanicznych, ziemia zanieczyszczona arsenem, sole hartownicze zawierające cyjanki). Odpady (poddane granulacji lub sproszkowaniu) deponowano w workach typu big-bag, kontenerach lub beczkach stalowych spełniających określone wymagania dotyczące rodzaju materiału, z którego są wykonane oraz parametrów wytrzymałościowych i wodoprzepuszczalności. Podstawową zasadą przy weryfikacji odpadów przeznaczonych do deponowania w składowiskach podziemnych jest wykluczenie właściwości wybuchowych, żrących, utleniających, łatwopalnych, lotnych, radioaktywnych i biodegradowalnych (w Wielkiej Brytanii dopuszczane są odpady, które w swoim składzie zawierają do 3% całkowitego węgla organicznego).

W Polsce, w podziemnych składowiskach, deponowane są głównie odpady wydobywcze klasyfikowane do odpadów obojętnych lub odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne (np. wody złożowe pochodzące z różnych złóż węglowodorów). Na koniec 2019 r. funkcjonowały (wg uzyskanych koncesji) trzy podziemne składowiska odpadów, w których nagromadzono 13 276,64 Mg odpadów innych niż niebezpieczne i obojętnych (Sprawozdanie, 2021).

Z uwagi na pochodzenie odpadów oraz uwarunkowania prawne, odpady przeznaczone do podziemnego składowania można podzielić na dwie grupy: **odpady wydobywcze** i **odpady przemysłowe**. W każdej z tych grup można wydzielić odpady niebezpieczne.

Wśród **odpadów wydobywczych** wyróżnia się odpady z procesów udostępniania złoża oraz **odpady przeróbcze** z górnictwa: węgla kamiennego, miedzi oraz surowców skalnych. Ogólnie odpady te, ze względu na swoje właściwości fizyczno-chemiczne spełniają ustawowe wymagania w zakresie deponowania w podziemnych składowiskach, dlatego też zostały scharakteryzowane w niniejszym rozdziale. Jednak, uwzględniając hierarchię postępowania z odpadami (z naciskiem na ponowne użycie, recykling i odzysk) oraz szerokie możliwości ich zastosowania w innych gałęziach gospodarki (w tym np. w górnictwie do zasypywania likwidowanych szybów kopalnianych, doszczelniania starych zrobów, profilaktyki przeciwpożarowej), zasadne wydaje się w tym przypadku rozważenie innych możliwości niż deponowanie w podziemnym składowisku.

Odrębną grupę odpadów wydobywczych stanowią wody złożowe oraz zużyte płuczki i inne opady wiertnicze (np. filtraty zaczynów cementowych), które nie zostały zaklasyfikowane jako odpady niebezpieczne. Odpady te spełniają również ustawowe wymagania i mogą być deponowane w podziemnych składowiskach.

Grupa **odpadów przemysłowych** stanowi szeroką grupę pod względem rodzajów odpadów charakteryzujących się odmiennymi właściwościami fizyczno-chemicznymi. Odpady te mogą klasyfikować się do procesu deponowania pod warunkiem spełnienia zapisów ww. art. 126 ustawy pgg.

Należy również uwzględnić dostępność technologii dla podziemnego składowania tego rodzaju odpadów oraz dobór właściwych procesów na przetwarzania odpadów przed ich składowaniem (nie wszystkie rodzaje odpadów w sposób bezpośredni mogą być deponowane w podziemnych składowiskach, część z nich powinna wcześniej zostać poddana procesom stabilizacji i/lub zestalania).

W grupie odpadów przemysłowych do podziemnego składowania mogą zostać zaklasyfikowane odpady, których zagospodarowanie stwarza obecnie problem (w tym jest nieopłacalne z przyczyn ekonomicznych i technologicznych). Są to przede wszystkim odpady niebezpieczne, tj. zawierające: rtęć, metale ciężkie (np.: chrom, arsen), cyjanki oraz odpady z czyszczenia gazów odlotowych (w tym m.in. z hutnictwa żelaza i stali, hutnictwa metali nieżelaznych, ze spalarni odpadów), odpady z procesów galwanicznych (szlamy i osady pofiltracyjne zawierające substancje niebezpieczne), zanieczyszczone odpady materiałów budowlanych (np. zmieszane lub wysegregowane odpady z betonu, gruzu ceglanego, odpadowych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia zawierające substancje niebezpieczne), odpady ze spalarni odpadów komunalnych i przemysłowych (popioły i pyły zawierające substancje niebezpieczne), odpady zestabilizowane lub zestalone, powstające w wyniku poddania tym procesom ww. rodzajów odpadów.

W tabeli 30 zestawiono rodzaje substancji i odpadów jakie mogą być gromadzone w poszczególnych rodzajach obiektów podziemnych

8.4.1. Substancje

Substancja jest to medium występujące w przyrodzie lub uzyskane za pomocą procesu produkcyjnego wraz z wszelkimi dodatkami wymaganymi do zachowania jego trwałości oraz wszelkimi zanieczyszczeniami powstałymi w procesie produkcyjnym, lokowane w przestrzeni podziemnej (Ustawa z dnia 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach; zmienione). Wyróżnia się substancje jednoskładnikowe oraz wieloskładnikowe. Substancja jednoskładnikowa to taka, w której jeden główny składnik stanowi 80% wagowych substancji. Natomiast definiowana na podstawie swojego składu substancja wieloskładnikowa to substancja, w której więcej niż jeden główny składnik jest obecny w stężeniu ≥10% wagowych i ≤80% wagowych[36]. Obecne zanieczyszczenia w substancji w stężeniu ≥1% powinny zostać również uwzględnione w jej charakterystyce. W kontekście magazynowania energii, w niniejszym rozdziale przedstawiono charakterystykę pod względem fizyczno-chemicznym wodoru, dwutlenku węgla, sprężonego powietrza oraz ropy naftowej i innych paliw w stanie płynnym.

[36] Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów.

8.4.1.1. Wodór

Wodór występuje głównie w postaci związków chemicznych, w stanie wolnym (jako H_2) jest bardzo rzadko spotykany. Jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych pierwiastków mającym szerokie zastosowanie w procesach przemysłowych. Ze względu na swoje właściwości fizyczne i chemiczne pierwiastek ten może być szeroko stosowany jako źródło paliwa alternatywnego. Obecnie, w zależności od procesu produkcji i jego emisyjności, wyróżnia się:

- wodór konwencjonalny (szary wodór) – wytwarzany z paliw kopalnych, co wiąże się z wysoką emisją CO_2 w procesach: reformingu parowego gazu ziemnego, zgazowania węgla czy separacji z gazu koksowniczego;
- wodór niskoemisyjny (niebieski wodór) – wodór wytwarzany przy wykorzystaniu odnawialnych i nieodnawialnych źródeł energii, m.in. w procesach: elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł konwencjonalnych, gdzie produkuje się ją z wychwytem i składowaniem CO_2 (CCS) lub wychwytem i wykorzystaniem CO_2 (CCU), reforming parowy biogazu i biometanu, zgazowanie węgla z CCS;
- wodór odnawialny (zielony wodór) – wodór wytwarzany w drodze elektrolizy wody z wykorzystaniem energii pochodzącej w 100% ze źródeł odnawialnych, w procesie np. reformingu biogazu, biometanu lub biochemicznego przekształcania biomasy (Publikacja 11/I, 2021; Uchwała nr 149, 2021).

Charakterystyka wodoru. Wodór jest bezbarwnym i bezwonnym gazem, charakteryzuje się temperaturą topnienia –259°C i wrzenia –253°C (przy tej temperaturze przechodzi w stan ciekły), natomiast temperatura samozapłonu wynosi 560°C (w stanie ciekłym 571°C). Zakres palności zawiera się w przedziale 4–77%. Wodór pali się niewidzialnym płomieniem. Jest stabilny w warunkach normalnych, natomiast może gwałtownie reagować z substancjami utleniającymi, a z powietrzem może tworzyć mieszaninę wybuchową. Zakres wybuchowości wodoru (stężenia przy którym pod wpływem bodźca energetycznego następuje wybuch) mieści się w przedziale 18,3–59,0%, przy minimalnej energii zapłonu na poziomie 0,017MJ (Publikacja 11/I, 2021). Gęstość wodoru (wg https://www.airproducts.com/) wynosi 0,081 kg/m^3 (w stanie gazowym) oraz 70,8 kg/m^3 (w stanie ciekłym). Przewodność cieplna wynosi 0,1745 W/(m·K), a ciepło właściwe 14,195 kJ/(kg·K) (w 273 K). Wartość opałowa wodoru jest bardzo wysoka i wynosi 120 MJ/kg (dla przykładu: węgiel 25 MJ/kg, benzyna 47 MJ/kg [Wiącek, 2011]). Wodór charakteryzuje się dużą dyfuzyjnością i małą objętościową gęstością energii, tj. 0,01079 MJ/L (dla porównania: metan 0,0378 MJ/L, olej napędowy 37,3 MJ/L, benzyna 34,2 MJ/L [Ślizowski J. i in., 2017]).

Magazynując wodór jako nośnik energii zwiększa się jego gęstość energii. W przypadku wodoru w postaci sprężonej w wyniku zwiększenia dwukrotnego ciśnienia otrzymuje się w przybliżeniu podwojenie ilości zgromadzonej w nim energii. Wyższą gęstość energii uzyskuje się magazynując wodór

Tabela 30

Rodzaje substancji/odpadów w kontekście sposobu i miejsca magazynowania/składowania

Rodzaj substancji/odpadu	Sposób gromadzenia substancji/odpadów				Rodzaj podziemnego obiektu (patrz: tab. 1)*							Uwagi
	bezzbiornikowe magazynowanie		podziemne składowanie									
	substancji	energii	odpadów	dwutlenku węgla	1	2	3	4	5	6	7	
Dwutlenek węgla	n.d.	n.d.	n.d.	tak	1	2	3	4	5	6	7	przedstawiony oddzielnie
Wodór (energia)	tak	tak	n.d.	n.d.	1	2		4	5	6	7	wzrosło zainteresowanie
Ropa i gaz ziemny oraz inne paliwa w stanie płynnym	tak	n.d.	n.d.	n.d.	1	2		4	5	6	7	największe zapotrzebowanie
Sprężone powietrze (energia)	tak	tak	n.d.	n.d.	1	2		4	5	6	7	brak doświadczeń w Polsce
Odpady wydobywcze – odpady z górnictwa kopalin innych niż rudy metali	n.d.	n.d.	tak (możliwy odzysk)	n.d.				4	5	6	7	preferowany odzysk, odpad stały
Odpady wydobywcze – odpady z górnictwa miedzi	n.d.	n.d.	tak (możliwy odzysk)	n.d.				4	5	6	7	preferowany odzysk, odpad stały
Odpady przeróbcze – odpady przeróbcze inne niż niebezpieczne	n.d.	n.d.	tak (możliwy odzysk)	n.d.				4	5	6	7	preferowany odzysk, odpad stały
Odpady przeróbcze – odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	preferowany odzysk, odpad stały
Wody złożowe pochodzące z różnych złóż węglowodorów	n.d.	n.d.	tak	n.d.	1	2		4	5	6		bezpośrednio w górotworze, odpad płynny; jest zapotrzebowanie na rynku
Płuczki wiertnicze nie zawierające substancji niebezpiecznych	n.d.	n.d.	tak	n.d.	1	2		4	5	6		bezpośrednio w górotworze, odpad płynny; jest zapotrzebowanie na rynku
Płuczki olejowe	n.d.	n.d.	nie/tak	n.d.	1	2		4	5	6		bezpośrednio w górotworze nie
Odpady ze spalarni odpadów (odpady niebezpieczne)	n.d.	n.d.	tak (możliwy odzysk)	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu typu big-bag lub metalowym, odpady stałe
Odpady w postaci zestalonej	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu typu big-bag lub metalowym, odpady stałe
Odpady zawierające azbest	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu (w przypadku mniejszych elementów – big-bag), odpady stałe
Odpady zawierające rtęć	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu beczki metalowe spełniające wymagania techniczne, po procesie konwersji, oddzielna kwatera
Odpady z procesów galwanicznych	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu beczki metalowe spełniające wymagania techniczne
Odpady budowlane zawierające substancje niebezpieczne	n.d.	n.d.	tak	n.d.				4	5	6	7	w opakowaniu typu big-bag, odpady stałe

* w wybranych przypadkach magazynowanie/składowanie może być ekonomicznie nieopłacalne

1 – w formacjach złóż węglowodorów, 2 – w formacjach wodonośnych, 3 – w formacjach złóż węgla kamiennego, 4 – w naturalnych pustkach skalnych, 5 – w komorach solnych, 6 – w komorach skalnych, 7 – w wyrobiskach kopalń podziemnych

n.d. – nie dotyczy

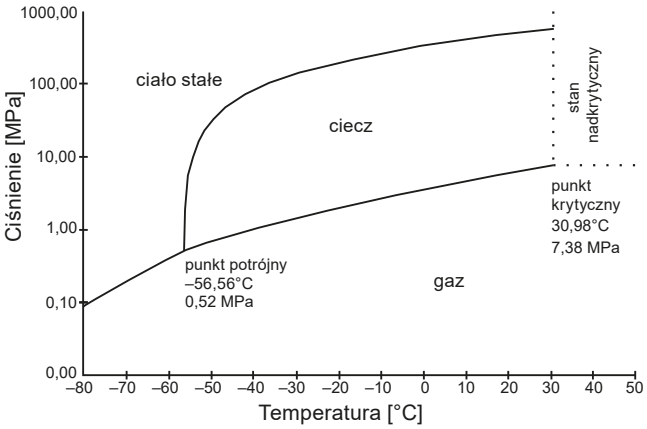
w postaci skroplonej (Bartosik, 2016). Gęstość zmagazynowanej energii dla wodoru wynosi ok. 280 kWh/m^3 (Górowska, 2015).

8.4.1.2. Dwutlenek węgla

Dwutlenek węgla w warunkach atmosferycznych występuje w postaci gazu. Jest bezbarwny, bezwonny, nietoksyczny, niepalny i cięższy od powietrza (ok. 1,5 raza). W warunkach normalnych jest stabilny, całkowicie rozpuszcza się w wodzie i w połączeniu z wodą tworzy kwas węglowy. Natomiast przy zmianie ciśnienia i temperatury zmienia się również jego stan skupienia. W temperaturze 31°C, ciśnieniu 7,38 MPa dwutlenek węgla osiąga punkt krytyczny i przechodzi do fazy nadkrytycznej, w której przyjmuje gęstość cieczy (rys. 52). Natomiast jego lepkość i ściśliwość pozostają charakterystyczne dla gazu, co jest korzystne przy zatłaczaniu do struktur głębokich (Dubiński i in., 2010).

Zwiększając gęstość dwutlenku węgla, zwiększa się pojemność złoża do jego składowania ze względu na efektywniejsze wykorzystanie przestrzeni porowej w złożu. Zakłada się, że głębokość krytyczna dla dwutlenku węgla (tj. głębokość poniżej której przechodzi przez punkt krytyczny do fazy nadkrytycznej) wynosi ok. 800 m (Luboń, 2020; rys. 53).

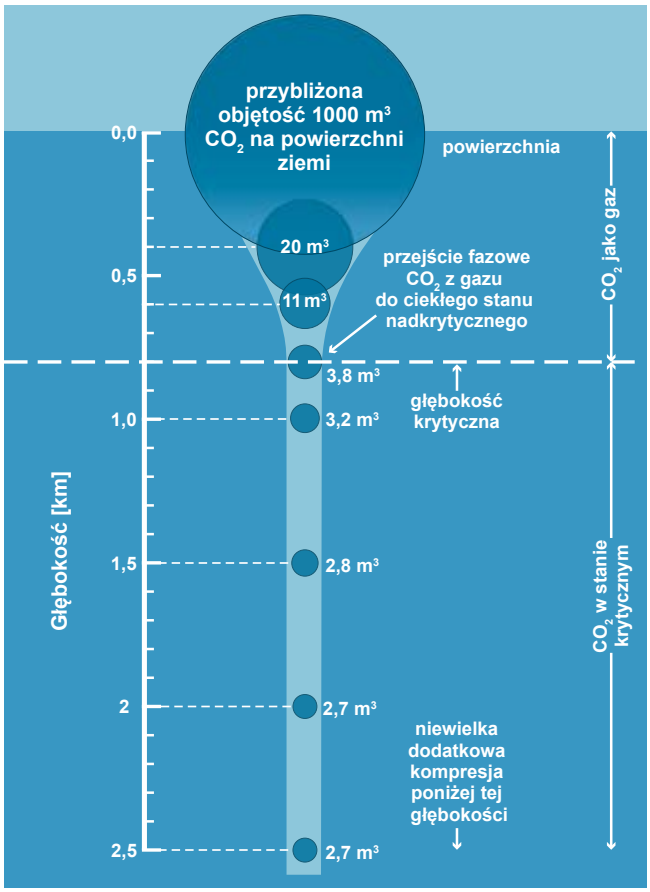
Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w załączniku podaje szczegółowe kryteria akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla kierowanego do podziemnego składowiska dwutlenku węgla dla poszczególnych typów technologii wychwytu CO_2 (Rozporządzenie..., 2015). Są one podstawą do przeprowadzania analizy zgodności strumienia dwutlenku węgla, tzn. stwierdzenia, czy analizowane parametry strumienia mieszczą się w dopuszczalnym zakresie. Analiza zgodności polega na badaniach próbek przyjmowanego strumienia dwutlenku węgla, prowadzona jest co najmniej raz na trzy miesiące lub po każdej zmianie procesu technologicznego wychwytu dwutlenku węgla, pod kątem zgodności z opisem podstawowym i ww. kryteriami akceptacji składu strumienia.



Rys. 52. Diagram fazowy CO_2 (Włodek, 2012)

Ocena ryzyka polega na wykazaniu, że zawartość innych gazów i substancji w składzie strumienia dwutlenku węgla, który będzie zatłaczany do składowiska, nie stanowi zagrożenia dla środowiska lub zdrowia i życia ludzi oraz jest poniżej poziomów, które mogłyby negatywnie wpłynąć na integralność podziemnego składowiska dwutlenku węgla oraz jego sieci transportowej. Charakterystyka zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla powinna obejmować:

- opis i wyniki analizy zgodności oraz wskazanie zastosowanej metody badawczej;
- opis zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla obejmujący określenie gęstości oraz składu (min. zawartość CO_2 oraz innych gazów i substancji; różnica pomiędzy strumieniem przyjmowanym polega na obecności gazów lub substancji wskaźnikowych dodanych na potrzeby monitoringu), a także ciśnienia oraz temperatury;
- opis zmian mogących wystąpić w składzie chemicznym strumienia w kompleksie podziemnego składowania;
- opisy zmian cech charakterystycznych (parametrów fizycznych) i głównych właściwości fizykochemicznych strumienia w kompleksie podziemnego składowania;
- informacje dotyczące zachowania środków ostrożności podczas prowadzenia działalności w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla.



Rys. 53. Wzrost gęstości CO_2 wraz z głębokością (Luboń, 2020)

8.4.1.3. Sprężone powietrze

Powietrze to mieszanina gazów, w której ok. 78% obj. stanowi azot, tlen 21% obj., a pozostałe gazy 1% obj. (w tym argon – 0,9% obj., natomiast wodór, dwutlenek węgla, gazy szlachetne, tj.: neon, hel, ksenon i radon, tylko 0,1% obj.). Skład powietrza ogólnie jest niezmienny pomiędzy poziomem morza a wysokością ok. 20 km. Natomiast w zależności od ciśnienia i temperatury zmienia się jego gęstość. I tak, przy ciśnieniu 1050 hPa, temperaturze 20°C i wilgotności względnej 65% gęstość powietrza wynosi 1,185 kg/m³. Przy tym ciśnieniu i temperaturze 1 kg powietrza ma objętość 0,844 m³. Właściwości te (zmiany ciśnienia i gęstości powietrza) są wykorzystywane przy zastosowaniu sprężonego powietrza jako nośnika energii (Properties of Compressed Air, 2007). Gęstość zmagazynowanej energii dla sprężonego powietrza wynosi ok. 3 kWh/m^3 (Górowska, 2015).

8.4.1.4. Ropa naftowa, gaz ziemny i inne paliwa w stanie płynnym

Ropa naftowa występuje w stanie ciekłym. Charakteryzuje się barwą od jasnożółtej poprzez brązową do prawie czarnej. Skład ropy naftowej to przede wszystkim węglowodory alifatyczne, alicykliczne i aromatyczne, które stanowią ok. 97%, przy zawartości węgla ok. 85% (Chmielewski i in., 2020). Do głównych składników węglowodorowych zalicza się m.in.: *n*-heksan – 4,12%, *n*-heptan – 3,90%, oktan – 3,55%, ksyleny (mieszanina izomerów – 3,50%), *n*-nonan – 3,38%, pentan – 2,90% (Górowska, 2015). Ropa naftowa może także zawierać niewielkie ilości takich pierwiastków jak: siarka (0,5–6,0%), azot (0,1–1,2%) i tlen (0,1–4,0%) (Wieczorek, 2012). W zależności od zawartości siarki wyróżnia się ropę niskosiarkową (do 0,5% S), średniosiarkową (0,5–2,0% S) i wysokosiarkową (powyżej 2% S). Ponadto w ropie naftowej znajdują się w niewielkich ilościach pierwiastki śladowe, tj.: ołów, cyna, arsen, rtęć, german, antymon, tal, wanad, żelazo.

Ropa naftowa charakteryzuje się gęstością względną od 0,8–1,0 g/cm^3. W zależności od gęstości wyróżnia się (wg https://www.enea.pl/): ropy lekkie (<0,878 g/cm^3), średnie (od 0,878 g/cm^3 do <0,884 g/cm^3) oraz ciężkie (>0,884 g/cm^3). Lepkość kinematyczna wynosi 1,6–55,8 mm^2/s (w temp. 20°C) oraz 1,00–8,98 mm^2/s (w temp. 50°C). Temperatura płynięcia zawiera się w przedziale od –36 do 45°C. Ciepło spalania wynosi 42 257 kJ/kg, natomiast wartość opałowa – 42 417 kJ/kg (wg https://pgnig.pl/). W wyniku destylacji ropy naftowej, w zależności od temperatury wrzenia, otrzymuje się poniższe frakcje (Chmielewski i in., 2020):

- do 30°C – gaz (C1–C6);
- w przedziale 30–60°C – eter naftowy (C5–C7);
- w przedziale 60–120°C – benzyna lekka (C7–C8);
- w przedziale 70–150°C – benzyna ciężka (C6–C9);
- w przedziale 170–300°C – nafta (C10–C16);
- powyżej 300°C:
  - olej napędowy (C16–C18),
  - oleje woskowe (C18–C20),
  - woski parafinowe (C21–C40),
  - pozostałe frakcje.

Gaz ziemny jest mieszaniną węglowodorów szeregu parafinowego zawierającą w swoim składzie głównie metan, etan i propan, a także w znacznie mniejszych stężeniach wyższe węglowodory (<0,1% obj.) oraz niektóre niepalne gazy takie jak: azot, dwutlenek węgla i hel. Może zawierać inne zanieczyszczenia w śladowych ilościach, np. rtęć, siarkowodór (https://pgnig.pl/). Gaz ziemny jest bezbarwny i bezzapachowy, charakteryzuje się temperaturą zapłonu –188°C oraz temperaturą topnienia/krzepnięcia –183°C. Jest skrajnie łatwopalny, temperatura samozapłonu wynosi ok. 480–630°C. Jest lżejszy od powietrza i tworzy z powietrzem mieszaniny wybuchowe. Ciepło spalania wynosi 26,0–34,0 MJ/m^3, natomiast wartość opałowa – 24,0–31,0 MJ/m^3.

Gaz ziemny skroplony występuje w stanie skupienia ciekłym i zajmuje objętość ok. 600 razy mniejszą niż gaz. Jest bezbarwny i bezzapachowy, skrajnie łatwopalny (dolna granica palności – 4,3% obj., górna – 16,2% obj.). Temperatura samozapłonu (wg https://www.psgaz.pl/) wynosi ok. 560°C.

Gazy skroplone węglowodorowe to mieszanina węglowodorów alifatycznych, której głównymi składnikami są: propan (C_3H_8) i butan (C_4H_{10}). Zgodnie z klasyfikacją podaną w normie PN-C-96008:1998 wyróżnia się trzy grupy gazów skroplonych: butan techniczny (B), propan-butan (P/B) i propan techniczny (P). Butan techniczny to mieszanina węglowodorów alifatycznych zawierająca do 95% butanu. Temperatura samozapłonu wynosi 430°C. Jest bezbarwny i bezzapachowy, skrajnie łatwopalny (dolna granica wybuchowości [stężenia przy którym pod wpływem bodźca energetycznego następuje wybuch] – 1,9%, górna – 8,5%). Propan techniczny zawiera w swoim składzie do 90% propanu. Jest również bezbarwny i bezzapachowy, a temperatura samozapłonu wynosi 470°C.

Mieszanina propan-butan to mieszanina węglowodorów w zakresie C_3–C_7 (propanu w zakresie 18–55% i butanu do 40%) wrzących w temperaturze od –40°C do 80°C. W składzie może również występować buta-1,3-dien w ilości nie większej niż 0,1%. Ciepło spalania dla propanu wynosi 0,43 MJ/kg, natomiast dla butanu 0,39 MJ/kg. Temperatura zapłonu (wg https://alwi-gazy.pl/) wynosi –95°C dla propanu, a dla butanu –60°C.

8.4.2. Odpady

Odpad jest to każde medium, którego posiadacz się pozbywa, zamierza się pozbyć lub do którego pozbycia się jest obowiązany (Ustawa..., 2012; zmienione). W poradniku przyjęto podział odpadów na wydobywcze (w tym przeróbcze) i przemysłowe.

8.4.2.1. Odpady wydobywcze

Odpady wydobywcze to odpady powstające w procesach poszukiwania, rozpoznawania, wydobywania i udostępniania kopalin ze złóż (Ustawa o odpadach wydobywczych, 2008).

Odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali (tzw. skała płonna)

Kod odpadów. Odpady z wydobywania kopalin klasyfikowane są w podgrupie 01 01 jako rodzaj 01 01 02 – odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali (załącznik do Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów).

Źródła powstawania. Odpady z wydobywania kopalin są wytwarzane w wyniku procesów poszukiwawczych i eksploatacyjnych stosowanych w podziemnych (kopalnie węgla kamiennego) i odkrywkowych (surowce skalne) zakładach górniczych. Źródłem powstawania tych odpadów są roboty górnicze i przygotowawcze.

Charakterystyka. Odpady wydobywcze wytwarzane w kopalniach węgla kamiennego, pod względem petrograficznym, charakteryzują się niejednorodnym składem, w którym wyróżnia się (Twardowska i in., 1998; Skarżyńska, 1997): iłowce (0–98%), mułowce (2–89%), piaskowce (0–85%), łupki węglowe (2–25%), a także niewielkie ilości węgla (3–10%). Wykazują one również duże zróżnicowanie uziarnienia w granicach od ponad 20 mm do 500 mm, przy czym większość okruchów osiąga rozmiary 100–200 mm (Kozioł, Uberman, 1996). Natomiast pod względem mineralogicznym, odpady zawierają ok. 50–70% minerałów ilastych, 20–30% kwarcu oraz 10–20% innych minerałów (m.in.: piryt, chloryt, syderyt, ankeryt) i substancji węglowej (Skarżyńska, 1997). Skład chemiczny odpadów jest wynikiem udziałów ilościowych kwarcu, skaleni i minerałów ilastych, przy czym jednym z podstawowych wskaźników do oceny minerałów ilastych jest stosunek zawartości glinu w przeliczeniu na Al_2O_3 do krzemionki SiO_2. Wskaźnik ten dla odpadów pochodzących z GZW zawiera się w przedziale 0,232–0,459 (średnio: 0,364) i określa charakter glinokrzemianowy odpadów (Bojarska, Bzowski, 2012). W przypadku odpadów z LZW wskaźnik ten wynosi 0,34–0,55 (średnio: 0,46).

W odpadach wydobywczych zawartość metali jest zróżnicowana. Dla tych pochodzących z GZW zawiera się w przedziale 1,8–11,7 mg/kg suchej masy (s.m.) dla arsenu, dla kadmu 0,025–14,000 mg/kg s.m., kobaltu 10,6–25,0 mg/kg s.m., chromu 30,0–1171,2 mg/kg s.m., miedzi 23,4–86,0 mg kg s.m., rtęci <0,1–0,1 mg/kg s.m., molibdenu <0,03–3,20 mg/kg s.m., niklu 26,0–91,9 mg/kg s.m., ołowiu 3,45 do172,0 mg/kg s.m., wanadu 115,7–691,0 mg/kg s.m., cynku 37,6– 750 mg/kg s.m. (Klojzy-Karczmarczyk i in., 2016). Zawartość metali ciężkich w odpadach z LZW jest na zbliżonym poziomie jak w GZW, z wyjątkiem chromu (51–147 mg/kg s.m.) oraz cynku (80–86 mg/kg s.m.). Ponadto stwierdzono zawartości baru w przedziale 270–731 mg/kg s.m. (Bzowski, Dawidowski, 2013).

Odpady wydobywcze charakteryzują się również zróżnicowaną zawartością siarki, która dla odpadów z GZW zawiera się w granicach 0,61–1,95% (Klojzy-Kaczmarczyk, Mazurek, 2017), a w odpadach LZW wynosi 0,14%.

Odpady wydobywcze z górnictwa skalnego stanowią w przeważającej większości skały płonne z nadkładu i przerostów (np. piaski, żwiry, iły, gliny, gliny piaszczyste, gliny zwietrzelinowe, mułowce piaszczyste), warstwy usuniętej gleby oraz odpady zwietrzałej kopaliny skał osadowych, magmowych i metamorficznych, np. zwietrzeliny: bazaltowe, granitowe, marmurowe, dolomitowe (Bednarski, 1955, Wyszomirski i in. 2021).

Odpady skalne z górnictwa miedzi

Kod odpadów. Odpady z wydobywania kopalin z górnictwa rud miedzi są klasyfikowane w podgrupie 01 01 jako:

- 01 01 01 – odpady z wydobywania rud metali (z wyłączeniem 01 01 80);
- 01 01 80 – odpady skalne z górnictwa miedzi, cynku i ołowiu (załącznik do Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów).

Źródła powstawania. Odpady z wydobywania rud miedzi wytwarzane są w trakcie robót udostępniających złoże, głębienia szybów, robót przygotowawczych i eksploatacyjnych.

Charakterystyka. Odpady wydobywcze, pod względem petrograficznym, stanowią piaskowce, dolomity, wapienie, anhydryty, łupki, margle i żwiry (Kotarska, 2012). Głównymi składnikami pod względem chemicznym są (Grotowski i in., 1995): SiO_2 (ok. 60% wag.), CO_3 (10–25%), CaO (10–20%), MgO (3–10%) i Al_2O_3 (5–6%), występujące w różnych proporcjach w zależności od składu wyjściowego skały płonnej. Stwierdzono również występowanie Na_2O, K_2O i Fe (w ilościach ok. 1% wag.), a śladowo Cu i Mn (0,18–0,31%). Wyniki analizy wyciągów wodnych (realizowanych w latach 2006–2010) odpadów skały płonnej Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) składowanych na zwałowiskach wykazują, że metale nie przejawiają tendencji do przechodzenia do roztworu, natomiast stwierdzono podwyższoną zawartość siarczanów i substancji rozpuszczonych (Kotarska, 2012). Zawartości poszczególnych badanych metali w skale płonnej zawierają się w przedziale 0,034–0,460 mg/kg s.m. dla arsenu, 0,20–1,30 mg/kg s.m. dla baru, <0,037 mg/kg s.m. dla kadmu, <0,068–0,070 mg/kg s.m. dla chromu, 0,23–1,20 mg/kg s.m. dla miedzi, <0,005–0,006 mg/kg s.m. dla rtęci, <0,095–3,420 mg/kg s.m. dla molibdenu, <0,15–0,16 mg/kg s.m. dla niklu, <0,42–1,58 mg/kg s.m. dla ołowiu, 0,18–0,28 mg/kg s.m. dla antymonu, 0,04–1,50 mg/kg s.m. dla selenu, <0,16–0,50 mg/kg s.m. dla cynku. Badano również zawartości: chlorków 50–2162 mg/kg s.m., fluorków 1,26–3,33 mg/kg s.m. oraz siarczanów <23–15 575 mg/kg s.m. Rozpuszczony węgiel organiczny zawierał się w granicach 8,76–79,5 mg/kg s.m., natomiast stałe związki rozpuszczone – 1130–25 660 mg/kg s.m. (Kotarska, 2012).

Wody złożowe pochodzące z różnych złóż węglowodorów

Kod odpadu. Wody złożowe klasyfikowane są jako odpad o kodzie 01 02 01 – odpady z wydobywania kopalin innych niż rudy metali.

Źródła powstawania. Wody złożowe wytwarza się w procesach wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego. Właściwości fizyczno-chemiczne tych wód zależą od rodzaju skały zbiornikowej, jej wieku oraz charakterystyki kolektora. Odpadowe wody charakteryzują się zróżnicowaną mineralizacją oraz zawartością jonów: sodu, potasu, magnezu, wapnia, a także jonów chlorkowych, siarczanowych i węglanowych. Zawierają również (w ilościach śladowych) jony innych pierwiastków, takich jak: rad, stront, miedź, brom, jod, mangan,

żelazo, rtęć, ołów itp. Pod względem chemicznym wody złożowe stanowią silnie zmineralizowane solanki chlorkowo-sodowe (Lewkiewicz-Małysa, Konopka, 2009; Kluk, 2011). Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę właściwości fizyczno-chemicznych odpadowych wód złożowych występujących w różnych rejonach Polski.

Charakterystyka. Odpadowe wody złożowe w rejonie zielonogórskim charakteryzują się bardzo zróżnicowaną mineralizacją, osiągającą wartość do 190 g/dm^3, określoną przez zawartość jonów chlorkowych i siarczanowych. Zanieczyszczenia typu organicznego określone wartością ChZT = 45,5 ÷ 110 mgO_2/dm^3 występują w stopniu miernym i są to głównie ropopochodne w ilości 21 ÷ 110 mg/dm^3. Zawierały one również znaczący ładunek zawiesiny (do 2588 mg/dm^3) oraz wysokie koncentracje żelaza (do 470 mg_{Feog}/dm^3) (Lewkiewicz-Małysa, Konopka, 2009).

Charakterystyka wód złożowych występujących na Niżu Polskim (Lewkiewicz-Małysa, Konopka, 2009) wskazuje na ich typ chlorkowo-sodowo-wapniowy o zawartości ok. 140 g_{Cl}/dm^3 i 70 g_{Na}/dm^3 oraz mineralizacji ogólnej do ok. 240 g/dm^3. pH zawierało się w granicach 5,9–10,3. W próbkach wody złożowej występowała trudno opadająca zawiesina, w przedziale 0,5–5,9 g/dm^3, o niejednorodnym składzie. Ogólnie występowały podwyższone, zróżnicowane zawartości żelaza w ilości 90–2800 mg_{Feog}/dm^3, manganu 1,5–9,0 mg_{Mn}/dm^3 oraz jonów siarczanowych 450,3–1320,1 mg_{SO4}/dm^3.

Wody złożowe obszaru złoża Przemyśl charakteryzują się również zróżnicowanym stopniem mineralizacji: 696–31 232 mg/dm^3. Zawartość jonów chlorkowych występuje w szerokim przedziale: 175–15 792 mg/dm^3, jonów wapnia: 16–640 mg/dm^3, a jonów magnezu: 9–87 mg/dm^3. Zawartość żelaza była w zakresie 32–540 mg/dm^3, a pH zawierało się w granicach 6,74–7,42 (Kluk, 2011).

Płuczki wiertnicze niezawierające substancji niebezpiecznych

Kod odpadu. Zużyte płuczki wiertnicze są klasyfikowane w grupie 01 05 – płuczki wiertnicze i inne odpady wiertnicze.

Źródła powstawania. Zużyte płuczki wiertnicze powstają w procesie wiercenia otworów poszukiwawczych i eksploatacyjnych złóż surowców.

Charakterystyka. Zużyte płuczki wiertnicze stanowią odpad płynny. Ich skład chemiczny zależy od zastosowanych do przygotowania dodatków w postaci związków chemicznych, które dobiera się w zależności od warunków geologicznych, złożowych i technicznych wiercenia otworu (Macuda, 2010). Należą do nich m.in.: materiały ilaste (bentonit), materiały obciążające (baryt, hematyt), środki chemiczne obniżające parametry reologiczne płuczek (lignosulfoniany, taniny), środki chemiczne zmniejszające filtrację płuczek (środki skrobiowe, karboksymetyloceluloza LV i HV), środki smarne i powierzchniowo czynne (związki glicerydów i kwasów tłuszczowych, detergenty, emulgatory), inhibitory korozji, biocydy, dodatki chemiczne głównie: NaCl, KCl, K_2CO_3, $CaCl_2$ (Gluzińska i in., 2014).

Właściwości fizyczno-chemiczne odpadowych płuczek mogą się zmieniać w zależności od warunków geologiczno-technologicznych przewiercanych formacji skalnych oraz rodzaju użytych do wiercenia płuczek. W związku z powyższym, skład chemiczny odpadowych płuczek wiertniczych jest bardzo zróżnicowany.

8.4.2.2. Odpady przeróbcze

Odpady przeróbcze to grupa odpadów wydobywczych, które powstają w wyniku przeróbki wydobytych kopalin przy wykorzystaniu procesów mechanicznych, fizycznych, biologicznych, termicznych lub chemicznych oraz z połączenia tych procesów (Ustawa o odpadach wydobywczych, 2008).

Odpady przeróbcze inne niż niebezpieczne

Kod odpadów. Odpady z przeróbki kopalin klasyfikowane są w podgrupie 01 04 – opady z fizycznej i chemicznej przeróbki kopalin innych niż rudy metali – jako:

- 01 04 08 – odpady żwiru lub skruszone skały (inne niż niebezpieczne);
- 01 04 09 – odpadowe piaski i iły;
- 01 04 10 – odpady w postaci pyłów i proszków inne niż wymienione w 01 04 07;
- 01 04 12 – odpady powstające przy płukaniu i oczyszczaniu kopalin inne niż wymienione w 01 04 07 i 01 04 11;
- 01 04 13 – odpady powstające przy cięciu i obróbce postaciowej skał inne niż wymienione w 01 04 07 (załącznik do Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów).

Źródła powstawania. Źródłem powstawania odpadów są procesy przeróbcze w zakładach przeróbczych surowców skalnych (m.in. cięcie, szlifowanie, kruszenie, przesiewanie) i zakładach przeróbki mechanicznej węgla. Odpady z przeróbki węgla kamiennego wytwarzane są w procesach wzbogacania węgla, np. grawitacyjnego – w cieczach ciężkich, cyklonach z cieczą ciężką, osadzarkach (Blaschke, 2009). Odpady powstające w wyniku procesu flotacji zostaną przedstawione w osobnym podrozdziale.

Charakterystyka. Odpady o kodach 01 04 08 oraz 01 04 09 stanowią żwir, piasek czy ił pozaklasowy, tj. niespełniający norm dla dalszego ich zastosowania np. w budownictwie, drogownictwie, przemyśle szklarskim, oraz skruszone skały. Skład petrograficzny żwirów jest zróżnicowany. Można w nim wyróżnić skały krystaliczne, wapienie, piaskowce, skały krzemionkowe, przy czym ich udział procentowy jest zmienny (Wyszomirski i in., 2016). Piaski, pod względem chemicznym, zawierają krzemionkę (SiO_2), tlenki: żelaza (Fe_2O_3), tytanu (TiO_2), glinu (Al_2O_3), wapnia (CaO) oraz SO_3 (Kowieska, Kiełczewska, 2019).

Odpady przeróbcze z górnictwa węgla kamiennego (gruboziarniste i drobnoziarniste) klasyfikowane jako 01 04 12, pod względem petrograficznym charakteryzują się zbliżonym składem, w którym wyróżnia się iłowce, mułowce, piaskowce oraz łupki węglowe, a także niewielkie ilości węgla. Udział procentowy poszczególnych zawartości jest zmienny. W składzie odpadów gruboziarnistych (20–200 mm) iłowce zawierają się w przedziale 1–17%, mułowce: 65–95%, piaskowce: 0–11%, łupki węglowe: 2–24%, a także występują niewielkie ilości węgla: 0–5% (Twardowska i in., 1988). Odpady te są mało zasiarczone, zawartość siarki całkowitej nie przekracza 1% (Kozioł, Uberman, 1996). Natomiast odpady przeróbcze

drobnoziarniste (poniżej 20 mm) charakteryzują się składem petrograficznym, w którym wyróżnia się iłowce (0–7%), mułowce (30–84%) i piaskowce (śladowe ilości – 1%), łupki węglowe (14–25%), a także niewielki ilości węgla (0–4%) (Twardowska i in., 1988). W stosunku do odpadów gruboziarnistych zawierają większe ilości substancji węglowej oraz wyższa jest również zawartość siarki, zwłaszcza pirytowej (Weryński, 1994). Odpady powstające w zakładach przeróbczych górnictwa skalnego mogą stanowić fragmenty i okruchy skalne pochodzące z przerabianego materiału skalnego, a także zanieczyszczenia gliniaste, ilaste i organiczne. Odpady klasyfikowane jako 01 04 13 pod względem petrograficznym i chemicznym mają analogiczny skład jak skały, z których powstają (m.in. granit, marmur, bazalt, piaskowiec). Odpad stanowią kawałki skał oraz uwodniony szlam.

Odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla

Kod odpadów. Odpady z przeróbki kopalin klasyfikowane są w podgrupie 01 04 – opady z fizycznej i chemicznej przeróbki kopalin innych niż rudy metali – jako:

- 01 04 80* [37] – odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla zawierające substancje niebezpieczne;
- 01 04 13 – odpady z flotacyjnego wzbogacania węgla inne niż wymienione w 01 04 80 (załącznik do Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów).

Źródła powstawania. Odpady z flotacji węgla kamiennego są wytwarzane w procesie flotacji polegającym na wzbogacaniu węgla w urządzeniach zwanych flotownikami. W zależności od zastosowanego procesu flotacji (olejowy, powierzchniowy, pianowy) powstają odpady niebezpieczne z flotacyjnego wzbogacania węgla lub odpady inne niż niebezpieczne.

Charakterystyka. Odpady flotacyjne charakteryzują się uziarnieniem poniżej 1 mm i dużym zawilgoceniem (Kozioł, Uberman, 1996). Skład petrograficzny stanowią głównie skały ilaste, ale również można wyróżnić: kwarc, syderyt, minerały węglanowe, piryt, węgiel, serycyt oraz (rzadko) biotyt (Twardowska i in., 1988). Zawartość siarki wynosi powyżej 1%, a zawartość substancji węglowej wykazuje dużą zmienność.

8.4.2.3. Odpady przemysłowe

Odpady przemysłowe zostały zdefiniowane jako: *odpady powstające w wyniku działalności gospodarczej obejmującej procesy produkcji przemysłowej, z wyłączeniem odpadów niezawierających odpadów niebezpiecznych, które ze względu na swój charakter i skład są podobne do odpadów z gospodarstw domowych* (Projekt..., nr UD312).

Odpady ze spalarni odpadów

Kod odpadów. Odpady powstające w spalarniach odpadów komunalnych i przemysłowych są klasyfikowane w podgrupie 19 01 – odpady ze spalarni odpadów, w tym z instalacji do pirolizy odpadów. Są to zarówno odpady inne niż niebezpieczne, jak i niebezpieczne (powstające w zależności od stosowanej technologii), tj.:

- 19 01 05* – osady filtracyjne (np. placek filtracyjny) z oczyszczania gazów odlotowych;
- 19 01 07* – odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych;
- 19 01 10* – zużyty węgiel z oczyszczania gazów odlotowych;
- 19 01 11* – żużle i popioły paleniskowe zawierające substancje niebezpieczne;
- 19 01 12 – żużle i popioły paleniskowe inne niż wymienione w 19 01 11;
- 19 01 13* – popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne;
- 19 01 14 – popioły i żużle zawierające substancje inne niż wymienione w 19 01 13;
- 19 01 15* – pyły z kotłów zawierające substancje niebezpieczne;
- 19 01 16 – pyły z kotłów zawierające substancje inne niż wymienione w 19 01 15.

Źródła powstawania. Odpady tej podgrupy wytwarzane są w wyniku eksploatacji instalacji do termicznego przekształcania odpadów, instalacji waloryzacji żużli, instalacji do oczyszczania ścieków technologicznych. Stanowią one ok. 30% masy przetwarzanej odpadów w instalacjach termicznych, w tym ok. 26% to odpady inne niż niebezpieczne (żużle i popioły paleniskowe), natomiast pozostałe 4% to odpady niebezpieczne wyszczególnione powyżej (Poniatowska, Górecka-Andrzejewska, 2018).

Charakterystyka. Odpady niebezpieczne powstające w instalacji do termicznego przetwarzania odpadów (tj. żużle i popioły, popioły lotne oraz pyły) charakteryzują się wysoką zawartością metali ciężkich (m.in.: As, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Zn), WWA oraz dioksyn i furanów. Występują jako odpady stałe. Natomiast popioły i żużle powstające w instalacji do waloryzacji zawierają w swoim składzie tlenki: krzemu, tytanu, glinu i żelaza. Są to odpady stałe, rozdrobnione i przesiewane na sicie o dwóch klasach uziarnienia – 0–60 mm oraz 60–100 mm. Odpady niebezpieczne są poddawane procesom stabilizacji i zestalania (Poniatowska, Górecka-Andrzejewska, 2018; Czop i in., 2021). Osady filtracyjne powstające na filtrze próżniowym w instalacji do oczyszczania ścieków technologicznych mogą zawierać m.in.: metale ciężkie.

Odpady w postaci zestalonej

Kod odpadu. Odpady po procesie stabilizacji są klasyfikowane w podgrupie 19 03 – odpady stabilizowane lub zestalone. Do tej grupy zalicza się:

- 19 03 04* – odpady niebezpieczne częściowo stabilizowane, inne niż wymienione w 19 03 08;
- 19 03 05 – odpady stabilizowane inne niż wymienione w 19 03 04;
- 19 03 06* – odpady niebezpieczne zestalone;
- 19 03 07 – odpady zestalone inne niż wymienione w 19 03 06;
- 19 03 08* – częściowo stabilizowana rtęć.

[37] Kody oznaczone gwiazdkami oznaczają odpady niebezpieczne w katalogu odpadów, chyba że mają zastosowanie przepisy art. 7 ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach.

Źródła powstawania. Źródłem powstawania odpadów są procesy zestalania (immobilizacji) i stabilizacji różnych rodzajów odpadów, w tym w szczególności odpadów niebezpiecznych. Polegają one na zmianie parametrów chemicznych odpadów (w wyniku np. tworzenia mieszanin odpadów), które w efekcie powodują przekształcanie rozpuszczalnych związków zawierających metale ciężkie, siarczany czy chlorki w związki nierozpuszczalne takie jak: siarczki, wodorotlenki czy związki kompleksowe (Mikuła i in., 2017). Odpady niebezpieczne poddawane tym procesom nie powinny zawierać związków organicznych.

Charakterystyka. Najczęściej analizowanym procesom są poddawane następujące grupy odpadów (Fengler, 2012): odpady z procesów galwanicznych, pyły i szlamy przemysłowe, żużle, popioły i pyły z procesów termicznych (w tym z hutnictwa żelaza i stali, hutnictwa metali nieżelaznych, ze spalarni odpadów itp.), popioły, pyły i szlamy z procesów oczyszczania gazów. Poniżej jako przykład omówiono odpady ze spalarni odpadów komunalnych poddane procesom zestalania.

W instalacjach stabilizacji i zestalania, które funkcjonują w krajowych spalarniach odpadów komunalnych (Pająk, 2017), procesom tym są poddawane wytwarzane odpady niebezpieczne: stałe pozostałości z oczyszczania gazów odlotowych (19 01 07*), żużle i popioły (19 01 11*),popioły lotne (19 01 13*) i pyły kotłowe (19 01 15*). Celem etapu stabilizowania jest uzyskanie wewnętrznej bariery, mającej zapobiec wypłukiwaniu się rozpuszczalnych związków metali ciężkich, a w drugim etapie procesu (zestalanie) tworzy się dodatkową zewnętrzną barierę przez zastosowanie różnych spoiw hydraulicznych (np. cementu), które charakteryzują się różnymi mechanizmami wiązania chemicznego. W wyniku procesów stabilizacji i zestalania otrzymuje się odpady inne niż niebezpieczne, np. w formie granulatu (Fengler, 2012).

Odpady zawierające azbest

Kod odpadu. Odpady zawierające azbest klasyfikowane są w grupie 17 06 – materiały izolacyjne oraz materiały budowlane zawierające azbest. Do tej grupy zalicza się poniższe rodzaje odpadów:

- 17 06 01* – materiały izolacyjne zawierające azbest;
- 17 06 03* – inne materiały izolacyjne zawierające substancje niebezpieczne;
- 17 06 04 – materiały izolacyjne inne niż wymienione w 17 06 01 i 17 06 03;
- 17 06 05* – materiały budowlane zawierające azbest.

Źródła powstawania. Azbest (wyroby zawierające azbest), ze względu na swoje właściwości niepalne, był szeroko stosowany w kilku dziedzinach gospodarczych (Klemczak, Biegańska, 2009):

- w budownictwie (jako wyroby azbestowo-cementowe) do produkcji płyt falistych, płyt Karo, płyt warstwowych, rur ciśnieniowych, płyt okładzinowych i elewacyjnych zawierające 10–35% azbestu;
- w energetyce jako izolacje termiczne (w formie sznurów i tektur na uszczelnieniach) kotłów parowych, wymienników ciepła, zbiorników, przewodów rurowych, a także ubrań i tkanin ognioodpornych (w zależności od przeznaczenia zawierały 75–100% azbestu);
- w transporcie do termoizolacji i izolacji elektrycznych urządzeń grzewczych oraz jako elementy cierne (okładziny cierne i taśmy hamulcowe, stosowane do różnego rodzaju hamulców); zawartość azbestu zawierała się w granicach 15–75%.

W związku z tak szerokim zastosowaniem wyrobów zawierających azbest, źródłem powstawania odpadów są ww. gałęzie przemysłu. Obecnie jednak odpady zawierające azbest powstają w największych ilościach w wyniku prac remontowo-budowlanych. Są to głównie płyty faliste azbestowo-cementowe o zawartości azbestu 10–13% (tzw. eternit). Odpady zwierające azbest są klasyfikowane jako odpady niebezpieczne ze względu na udowodnione działanie kancerogenne na organizm ludzki (Obmiński, 1997).

Charakterystyka. Pod względem chemicznym jest to uwodniony krzemian magnezu, żelaza, wapnia i sodu. Natomiast pod względem mineralogicznym azbest stanowią minerały z grupy serpentynów (chryzotyl, tzw. azbest biały) o ogólnym wzorze $3MgO_2SiO_22H_2O$ oraz minerały z grupy amfiboli, tj.: krokidolit $NaFe(SiO_3)2FeSiO_3H_2O$ – tzw. azbest niebieski i amozyt $(FeMg)_7SiO_22H_2O$ – tzw. azbest brązowy. Azbest chryzotylowy różni się od azbestu amfibolowego, długością włókien i wytrzymałością. W porównaniu do azbestu amfibolowego, jest on wytrzymały, elastyczny, ognioodporny, źle przewodzi ciepło i elektryczność, jest odporny na alkalia, ale rozkłada się w kwasie solnym. Natomiast azbest amfibolowy jest kruchy i odporny na działanie kwasów (Program..., 2006; Smolik, Gembalczyk, 2007). Odpady zawierające azbest charakteryzują się zawartością minerałów z grupy chryzotylowej i amfibolitowej oraz spoiwa (głównie cementu).

Odpady zawierające rtęć

Kod odpadu. Odpady zawierające rtęć są klasyfikowane w różnych grupach, w zależności od źródła powstawania odpadów. Najczęściej wytwarzane są następujące rodzaje odpadów:

- 20 01 21* – lampy fluorescencyjne i inne odpady zawierające rtęć;
- 16 06 03* – baterie zawierające rtęć;
- 06 04 04* – odpady zawierające rtęć w grupie odpadów zawierających metale;
- 05 07 01* – odpady zawierające rtęć w grupie odpadów z oczyszczania i transportu gazu ziemnego.

Źródła powstawania. Wymiana oświetlenia (tzw. świetlówek), zarówno w gospodarstwach domowych, jak i w halach przemysłowych, to obecnie główne źródło odpadów zawierających rtęć. Ponadto w gospodarstwach domowych odpad mogą stanowić również zużyte termometry rtęciowe, aparaty do pomiarów ciśnienia krwi czy barometry, higrometry rtęciowe, a także zużyte baterie zawierające rtęć. Zużyte termometry rtęciowe mogą też pochodzić z kontroli procesów technologicznych w różnych dziedzinach przemysłu.

Charakterystyka. Podstawowym składnikiem odpadów jest rtęć. W zależności od typu kompaktowych lamp fluorescencyjnych może występować w ilości 1–25 mg. Ponadto

w zużytych lampach może być obecny ołów (do 1%), który pełni rolę aktywatora w lampach wyładowczych zawierających luminofor (Ulewicz, Maciejewski, 2009). Zużyte termometry, oprócz rtęci, w swoim składzie mogą zawierać także polimery syntetyczne i/lub szkło.

Odpady zawierające rtęć nie mogą być poddawane procesom odzysku. Jedyną metodą ich zagospodarowania są procesy unieszkodliwiania przez składowanie w składowiskach odpadów niebezpiecznych (obiekty powierzchniowe) oraz w podziemnych składowiskach odpadów niebezpiecznych. Przed procesem trwałego unieszkodliwienia na składowiskach powierzchniowych, odpady należy poddać procesom konwersji i zestalaniu, natomiast w składowiskach podziemnych – procesom konwersji[38]. Jako podziemne składowiska odpadów niebezpiecznych mogą być wykorzystane kopalnie soli przystosowane do trwałego składowania odpadów zawierających rtęć, które poddano konwersji, lub głębokie podziemne formacje skały zwięzłej zapewniające poziom bezpieczeństwa i zamknięcia co najmniej równoważny temu poziomowi w kopalniach soli[39]. Odpady powinny być deponowane w sposób selektywny, w pojemnikach w zapieczętowanej komorze przeznaczonej do składowania.

Odpady z procesów galwanicznych

Kod odpadów. Odpady z procesów galwanicznych klasyfikowane są w podgrupie 11 01 – odpady z obróbki i powlekania metali oraz innych materiałów (np. procesów galwanicznych, cynkowania, wytrawiania, fosforanowania, alkalicznego odtłuszczania, anodowania). Większość odpadów powstających w tej branży przemysłowej ma charakter płynny. Są to odpady kwasów i zasad o właściwościach żrących i utleniających. Natomiast w procesach podziemnego składowania potencjalnie można unieszkodliwić odpad o kodzie 11 01 09* – szlamy i osady pofiltracyjne zawierające substancje niebezpieczne.

Źródło powstawania. Odpad powstaje w wyniku sprasowania osadów na prasach filtracyjnych w procesie neutralizacji ścieków w zakładowych oczyszczalniach.

Charakterystyka. Odpad stanowią osady po neutralizacji ścieków zawierające w swym składzie wodorotlenki i nierozpuszczalne związki metali ciężkich (np. cynku, żelaza, miedzi, niklu, chromu) w zależności od stosowanych procesów technologicznych. Może zawierać także fragmenty płótna filtracyjnego. Odpad powinien zostać poddany procesom zestalania przed ich deponowaniem w podziemnych składowiskach.

Odpady materiałów budowlanych zawierające substancje niebezpieczne

Kod odpadów. W grupie odpadów z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej mogą być wytwarzane odpady materiałów i elementów, które zawierają substancje niebezpieczne. Klasyfikowane są one w podgrupie 17 01 – odpady materiałów i elementów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (np. beton, cegły, płyty, ceramika) jako rodzaj odpadu o kodzie: 17 01 06* – zmieszane lub wysegregowane odpady z betonu, gruzu ceglanego, odpadowych materiałów ceramicznych i elementów wyposażenia zawierające substancje niebezpieczne.

Źródło powstawania. Odpad powstaje w wyniku procesów rozbiórki obiektów przemysłowych, na terenie których były prowadzone różne procesy technologiczne związane z wytwarzaniem i przetwarzaniem substancji chemicznych klasyfikowanych jako niebezpieczne.

Charakterystyka. Odpad stanowi zanieczyszczony gruz z demontażu obiektów budowlanych np. węglowodorami (smoła, substancje ropopochodne) i innymi związkami (np. kwasami).

[38] „Konwersja" oznacza chemiczną zmianę stanu fizycznego rtęci ze stanu płynnego do siarczku rtęci lub porównywalnego związku chemicznego co najmniej równie stabilnego i co najmniej równie mało rozpuszczalnego w wodzie oraz niestanowiącego większego zagrożenia dla środowiska lub zdrowia niż siarczek rtęci.

[39] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/852 z dnia 17 maja 2017 r. w sprawie rtęci oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 1102/2008.

CZĘŚĆ II

Dokumentowanie warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów

1. DOKUMENTACJA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA W PROCESIE INWESTYCYJNYM. RYZYKO GEOLOGICZNE

Realizacja podziemnych bezzbiornikowych magazynów substancji oraz podziemnych składowisk odpadów jest skomplikowana. Największy wpływ na kształt procesu inwestycyjnego mają różne źródła prawa[40], które normują jego przebieg. W efekcie nie ma kompleksowego, zestandaryzowanego schematu postępowania obejmującego całość działań zmierzających do realizacji podziemnych magazynów i składowisk, począwszy od planowania przez budowę i eksploatację, aż do likwidacji. Dlatego ustalenie miejsca opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (DGI) w procesie inwestycyjnym jest trudne. Doświadczenia krajowe wskazują, że dokumentacja geologiczno-inżynierska najczęściej jest już wykonywana na etapie przygotowania wniosku o koncesję na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub podziemne składowanie odpadów (etap projektowania – rys. 54 lub etap dotyczący charakterystyki lokalizacji – rys. 55).

Poza względami prawnymi, na przebieg procesu inwestycyjnego mają wpływ również następujące czynniki:

- rodzaj działalności, tj. czy działalność będzie polegać na podziemnym magazynowaniu czy składowaniu i czy będzie obejmować jednoczesne wydobywanie kopaliny itp.;
- decyzje własne Inwestora, tj. czy ma ustaloną lokalizację, czy będzie jej poszukiwał itp.;
- uwarunkowania administracyjno-prawne w zakresie gospodarki odpadami, zagospodarowania przestrzennego (np. czy konieczne jest ujęcie inwestycji w dokumentach planistycznych), prawa geologicznego i górniczego, prawa ochrony środowiska oraz tzw. specustaw;
- aktualne zagospodarowanie górotworu przewidzianego pod obiekt podziemny, tj. czy inwestycję zaplanowano w nienaruszonym górotworze, czy przekształceniu ulegnie istniejący zakład górniczy;
- uwarunkowania geologiczne, techniczne, ekonomiczne, środowiskowe, społeczne, polityczne (patrz: cz. I, rozdz. 4).

Proces inwestycyjny przebiega dwiema ścieżkami:

- proceduralną, która oznacza konieczność uzyskania wymaganych prawem decyzji, zezwoleń i spełnienia różnych wymagań formalnoprawnych;
- badawczą, którą dzieli się na etapy kończące się osiągnięciem określonego celu badawczego.

Ścieżka proceduralna ma wiele kroków i jest nieco inna dla magazynowania substancji niż dla składowania odpadów lub dwutlenku węgla. Różnice dotyczą głównie liczby i rodzajów dokumentów, decyzji i uzgodnień. O ile w ścieżce proceduralnej etapy procesu inwestycyjnego mogą się na siebie nakładać i przebiegać równolegle (np. pozyskanie decyzji środowiskowej i pozyskanie decyzji zatwierdzającej dokumentację geologiczną), o tyle w ścieżce badawczej poszczególne etapy powinny rozpoczynać się dopiero po zakończeniu etapu poprzedniego.

Z punktu widzenia etapowania badań geologiczno-inżynierskich, będących przedmiotem poradnika, druga ścieżka ma większe znaczenie praktyczne. Zawiera ona pięć głównych etapów: wizję (pomysł), przygotowanie inwestycji, budowę, eksploatację i etap poeksploatacyjny (rys. 54). Nie odbiega ona szczególnie od ścieżki typowej dla realizacji obiektów budowlanych.

Przykładową ścieżkę prowadzenia inwestycji w warunkach krajowych w zakresie podziemnego magazynowania gazu opracowała i udostępniła na swoich stronach internetowych spółka celowa Gas Storage Poland, wydzielona prawnie z PGNiG SA, która jest operatorem systemu magazynowania w Polsce (tab. 31).

Zaprezentowana ścieżka postępowania (tab. 31) może być również stosowana do inwestycji polegających na budowie podziemnego składowiska odpadów lub dwutlenku węgla, ponieważ w wielu aspektach będzie przebiegała w podobny sposób jak dla podziemnego magazynu gazu. Istotne różnice będą wynikały z rodzaju wymaganej koncesji, z konieczności uzyskania dodatkowych decyzji lub uzgodnień wynikających z rodzaju obiektu oraz rodzaju odpadu (patrz: cz. I, rozdz. 8 – rys. 50).

Z przedstawionego schematu wynika, że kluczowe badania i analizy z zakresu geologii, w tym geologii inżynierskiej i górnictwa, od których w dużej mierze zależy powodzenie realizacji inwestycji i jej bezpieczeństwo, muszą być wykonywane na etapie projektowania obejmującego pozyskanie

[40] Podstawowymi aktami prawnymi w Polsce normującymi proces inwestycyjny w zakresie obiektów podziemnych wraz z obiektami budowlanymi służącymi do ich eksploatacji są Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze, Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane oraz Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Oprócz nich istnieją inne regulacje, które odnoszą się tylko do niektórych jego etapów lub czynności. Do takich regulacji zalicza się Ustawę z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, Ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Ustawę z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, a także Ustawę z dnia 29 stycznia 2004 r. Prawo zamówień publicznych, Ustawę z dnia 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne, Ustawę z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne.

koncesji na bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub składowanie odpadów (patrz: cz. I, rozdz. 8.1), ponieważ koncesja przypisana jest do konkretnej lokalizacji obiektu podziemnego. Na tym etapie bez **dokumentacji geologiczno-inżynierskiej** (jak i hydrogeologicznej) nie jest możliwa analiza aktualnych i przewidywanych zmian warunków geologiczno-inżynierskich, niezbędna do oceny przydatności badanego terenu pod inwestycję oraz do oceny możliwości wykonania obiektu podziemnego w wybranej lokalizacji. Analiza ta powinna uwzględniać nie tylko aktualny stan górotworu, lecz również prognozę jego zmian w wyniku budowy i eksploatacji (a także ewentualnej likwidacji) obiektu podziemnego.

Na świecie proces inwestycyjny jest ściśle połączony z etapami rozpoznania geologicznego. W praktyce wyróżnia się następujące etapy rozpoznania geologicznego (polskie nazwy są propozycją autorską):

– przegląd lokalizacji (ang. *Site screening*);
– wybór lokalizacji (ang. *Site selection*);
– charakterystyka lokalizacji (ang. *Site characterisation*).

Na każdym etapie mogą być wykonywane badania geologiczne (ang. *Site investigation*). W efekcie rozpoznania geologicznego oraz rankingu lokalizacji zostaje wybrana jedna lokalizacja (ang. *Final Investment Decision* – FID), dla której wykonuje się prace projektowe i administracyjno-prawne w celu uzyskania pozwolenia na budowę, a następnie na użytkowanie obiektu (ang. *Permitting*).

Etapy rozpoznania geologicznego zostały szczegółowo opisane m.in. w podręczniku dobrych praktyk dla projektów związanych ze składowaniem CO_2 (Best Practices, 2017).

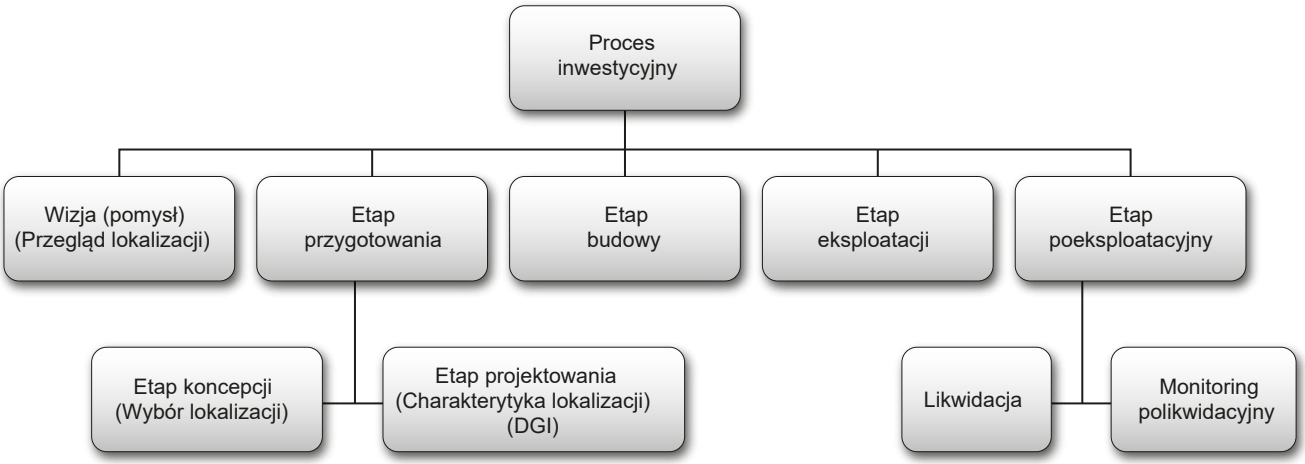
Przegląd lokalizacji (ang. *Site screening*) jest to ocena regionów geograficznych lub basenów sedymentacyjnych pod kątem możliwości zlokalizowania obiektu podziemnego i wskazanie obszarów perspektywicznych dla lokalizacji obiektu. Wykorzystuje się tu wszelkie dostępne dane (geologiczne, techniczne), a badania są ograniczone do minimum lub nie wykonuje się ich wcale. W polskich warunkach przegląd struktur jest najczęściej przedmiotem opracowań regionalnych i projektów badawczych wykonywanych na zlecenie organów państwowych lub opracowywanych w ramach zadań państwowej służby geologicznej.

Wybór lokalizacji (ang. *Site selection*) jest to ocena rankingowa wybranych obszarów perspektywicznych pod kątem możliwości realizacji obiektu podziemnego i wskazanie potencjalnych miejsc do jego budowy w obrębie obszaru perspektywicznego z uwzględnieniem kryteriów lokalizacyjnych. Wykorzystuje się tu, podobnie jak w przypadku przeglądu lokalizacji, wszelkie dostępne dane i wykonuje wstępne badania geologiczne (jeśli brak) na potrzeby zidentyfikowania tych miejsc. W polskich warunkach wybór lokalizacji wynika z analiz ekonomicznych i technicznych Inwestora z uwzględnieniem czynników środowiskowych, społecznych i technologicznych.

Charakterystyka lokalizacji (ang. *Site characterisation*) jest to ocena potencjalnych lokalizacji obiektu i wybór przynajmniej jednej spełniającej wszystkie kryteria lokalizacyjne, dla której będą prowadzone dalsze prace projektowe i działania w celu uzyskania pozwolenia na budowę. Na tym etapie wykorzystuje się wszelkie istniejące dane i pozyskuje się nowe z wielu dziedzin geologii. Etap ten często dzieli się na: charakterystykę wstępną i szczegółową. W polskich warunkach charakterystykę przeprowadza się na jednej wybranej lokalizacji.

W nawiązaniu do ścieżki badawczej zaproponowanej przez Gas Storage Poland, przegląd lokalizacji można prowadzić na etapie wizji (pomysłu). Wybór lokalizacji będzie wykonany na etapie koncepcji, natomiast charakterystyka lokalizacji na etapie projektowania (rys. 54).

Dane dotyczące lokalizacji obiektu podziemnego pozyskane na poszczególnych etapach rozpoznania geologicznego w efekcie pozwalają na analizę każdej lokalizacji pod kątem spełniania tzw. geologicznych kryteriów lokalizacyj-

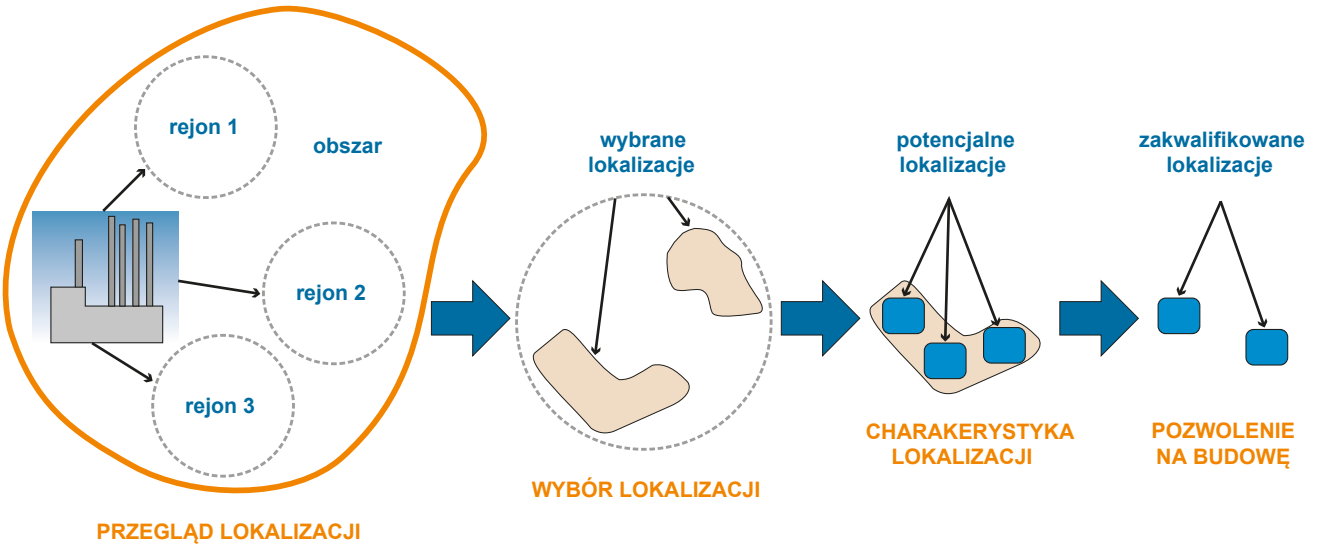


Rys. 54. Etapy procesu inwestycyjnego dla podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania

Tabela 31

Etapy procesu inwestycyjnego dla podziemnego magazynowania gazu wg Gas Storage Poland (https://ipi.gasstoragepoland.pl, zmienione)

Etap procesu inwestycyjnego		Działania operatora systemu magazynowania (https://ipi.gasstoragepoland.pl/)	Przykłady dokumentów merytorycznych
Wizja (pomysł)		określenie przedmiotu i celu inwestycji	strategia/plan działania
Etap przygotowania	etap koncepcji	opracowanie kilku wariantów lokalizacji inwestycji	studium lokalizacji PMG; koncepcje budowy PMG; studium wykonalności; studium pozyskania wody i zagospodarowania solanki
		przeprowadzenie wizji terenowych dla potwierdzenia możliwości technicznej lokalizacji inwestycji	
		przeprowadzenie procedury wstępnego uzgodnienia inwestycji dla określenia możliwości lokalizacyjnych w wybranym terenie wraz z oceną ryzyka ze szczególnym uwzględnieniem kryteriów środowiskowego, formalnoprawnego, własnościowego, ekonomicznego oraz technicznego	
	etap projektowania	wybór wariantu lokalizacji inwestycji	projekty robót geologicznych; raporty oddziaływania na środowisko; dokumentacje geologiczna, geologiczno-inżynierska i hydrogeologiczna; dokumentacja archeologiczna; wstępne założenia inwestycyjne; dokumentacja techniczno-ruchowa (w zależności od potrzeb: plan ruchu, projekt zagospodarowania złoża, projekty techniczne)
		wykonanie badań geologicznych, opracowanie i zatwierdzenie dokumentacji geologicznej, geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej; wykonanie badań archeologicznych i opracowanie dokumentacji archeologicznej	
		zawarcie umowy o ustanowienie użytkowania górniczego	
		uzyskanie koncesji (w przypadku obiektów w złożu także koncesji na poszukiwanie i rozpoznawanie lub na rozpoznawanie, a według projektowanej zmiany także na eksploatację kopaliny)	
		wykonanie map do celów projektowych i podziałów geodezyjnych	
		opracowanie dokumentacji projektowej (projektu architektoniczno-budowlanego i technicznego) wraz z jej uzgodnieniem z wymaganymi organami i jednostkami i uzyskanie pozwolenia na budowę	
		przeprowadzenie procedur formalnoprawnych w procesie przygotowania inwestycji: – ujęcie inwestycji w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy – wprowadzenie inwestycji do miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego gminy – ustalenie lokalizacji inwestycji celu publicznego w drodze decyzji administracyjnej (w przypadku braku planu miejscowego) – opracowanie raportu o oddziaływaniu inwestycji na środowisko i uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach realizacji inwestycji – przeprowadzenie wycen odszkodowań – przeprowadzenie negocjacji w zakresie ustalenia wysokości odszkodowania lub kwoty wykupu gruntu – uzyskanie prawa do terenu przez zawarcie umów cywilnoprawnych z właścicielami i użytkownikami gruntów, gdzie jest planowana lokalizacja inwestycji (dotyczy czasowego udostępnienia terenu pod inwestycję) – wykup gruntu, gdzie jest planowana lokalizacja inwestycji (dotyczy trwałego zajęcia gruntu pod inwestycję)	
Etap budowy		nadzór inwestorski nad realizacją inwestycji	program monitoringu; odbiory geotechniczne
Etap eksploatacji		uzyskanie pozwolenia na użytkowanie inwestycji (po zakończeniu budowy)	instrukcje; program monitoringu dla etapu eksploatacji
Etap poeksploatacyjny	likwidacja	czynności związane z likwidacją zakładu górniczego wynikające z ustawy pgg	program monitoringu dla etapu likwidacji
	monitoring polikwidacyjny	monitorowanie obiektu po jego likwidacji	raporty z monitoringu



Rys. 55. Etapy rozpoznania geologicznego (wg Best Practices, 2017, tłumaczone)

nych (patrz: cz. I, rozdz. 4). Na ich podstawie sporządza się rankingi lokalizacji, które mogą być jakościowe (spełnia/nie spełnia) lub punktowe.

Opisane etapy rozpoznania geologicznego zilustrowano na rysunku 55. W zależności od decyzji i potrzeb Inwestora, np. w przypadku, gdy z różnych przyczyn lokalizacja obiektu (lub obiektów) jest już określona, liczba etapów może się zmniejszyć (np. wyeliminowanie etapu przeglądu lokalizacji) lub ograniczyć do: etapu koncepcji opartego wyłącznie na analizie materiałów archiwalnych i etapu projektowego, w ramach którego pozyskuje się nowe dane na konkretnej lokalizacji w celu uzyskania stosownych pozwoleń.

Badania geologiczne są tylko jednym z wielu aspektów analiz lokalizacyjnych, do których należą również uwarunkowania polityczne, prawne, techniczne, ekonomiczne czy społeczne (patrz: cz. I, rozdz. 4), nie są one jednak przedmiotem poradnika.

Przy inwestycjach dotyczących zagospodarowania przestrzeni podziemnej istotne jest zrozumienie pojęcia ryzyka geologicznego z uwagi na duże koszty inwestycji. Analiza ryzyka powinna być prowadzona na każdym etapie realizacji inwestycji, także na etapie przeglądu lokalizacji (w wersji uproszczonej). Główne elementy analizy ryzyka to zebranie danych, identyfikacja zagrożeń, analiza częstości i konsekwencji ich wystąpienia (rys. 56). Ocena ryzyka daje podstawę do jego akceptacji lub do zaplanowania zabiegów w kierunku jego zminimalizowania (mitygacji).

W ocenie ryzyka duże znaczenie ma dotychczasowy stopień zagospodarowania górotworu. W przypadku **struktur geologicznych niezagospodarowanych**, które mają być przeznaczone na magazyny lub składowiska, na początku procesu inwestycyjnego dostępnych jest bardzo mało danych i badań geologicznych. Wiedza o lokalizacji jest niska i wymaga szczegółowych analiz regionalnych. Zasób danych znacząco zwiększa się wraz z postępem procesu inwestycyjnego (tab. 32). W konsekwencji w trakcie procesu zmniejsza się ryzyko geologiczne, zwiększa rozdzielczość modelu geologicznego oraz zmniejsza jego niepewność. W przypadku **struktur geologicznych zagospodarowanych**, które mają być przeznaczone na magazyny lub składowiska, na początku

Rys. 56. Analiza ryzyka dla podziemnych obiektów magazynowych (Evans, 2007, uzupełnione)

Tabela 32

Zapotrzebowanie na dane i badania geologiczne w trakcie procesu inwestycyjnego w zależności od etapu realizacji i stopnia zagospodarowania

Stopień zagospodarowania górotworu	Etap procesu inwestycyjnego / Posiadane dane geologiczne	Wizja	Etap przygotowania		Etap budowy	Etap eksploatacji	Etap poeksploatacyjny
			etap koncepcji	etap projektowania			
Górotwór niezagospodarowany	bardzo mała liczba danych; tylko nieliczne regionalne materiały archiwalne	badania archiwalne	badania wstępne	badania szczegółowe	badania kontrolne	badania monitoringowe	badania uzupełniające, badania monitoringowe
Górotwór zagospodarowany	bardzo duża liczba danych; istnieją liczne materiały archiwalne, badania z etapu projektowania, budowy i eksploatacji obiektu	–	badania archiwalne	badania uzupełniające			
Etapy badań geologicznych		–	przegląd lokalizacji (ang. *Site screening*) i/lub wybór lokalizacji (ang. *Site selection*)	charakterystyka lokalizacji (ang. *Site characterisation*)	badania sprawdzające i odbiorcze, monitoring	monitoring	badania na potrzeby rekultywacji, monitoring

procesu inwestycyjnego dostępnych jest dużo danych z rozpoznania struktury oraz z etapu eksploatacji, co znacząco zwiększa zasób danych (tab. 32). W konsekwencji już na początkowych etapach procesu inwestycyjnego ryzyko geologiczne jest mniejsze w porównaniu z sytuacją opisaną wyżej, a rozdzielczość modelu geologicznego jest większa.

Dlatego na każdym etapie procesu inwestycyjnego, a zwłaszcza na etapach przeglądu lokalizacji i wyboru lokalizacji, ogromne znaczenie ma zebranie, przegląd, analiza i ocena materiałów archiwalnych oraz ich aktualizacja w miarę pozyskiwania nowych informacji (patrz: cz. II, rozdz. 2.1).

Podsumowując, udział badań bezpośrednich, ich zakres, ilość, rodzaj i poziom szczegółowości będą zależały nie tylko od etapu procesu inwestycyjnego i rodzaju działalności (magazynowanie czy składowanie) czy rodzaju struktury geologicznej, lecz także w dużej mierze od stopnia zagospodarowania górotworu.

W tabeli 33 w nawiązaniu do opisanego schematu procesu inwestycyjnego z uwzględnieniem krajowej praktyki i przepisów prawa w zakresie podziemnych magazynów i podziemnych składowisk, zestawiono trzy zasadnicze elementy: etapy procesu inwestycyjnego, zakres badań geologicznych oraz proponowane lub wynikające z przepisów prawa dokumenty jakie należy wytworzyć w całym procesie inwestycyjnym, ze szczególnym naciskiem na opracowania z dziedziny geologii.

Tabela 33

Rodzaj badań geologicznych w nawiązaniu do procesu inwestycyjnego

Etapy procesu inwestycyjnego			Opis	Efekt prac	Podstawa prawna	Decyzje, koncesje, zezwolenia itp.	Rodzaj prac i badań geologicznych (ang. *Site investigation*)			Zalecany rodzaj modelu
							przegląd mat. arch.	badania terenowe	badania laboratoryjne	
1			**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Wizja (pomysł)			najczęściej wynika z krajowych i międzynarodowych polityk, strategii, specustaw i innych dokumentów planistycznych lub z indywidualnych potrzeb inwestora	n.d.	brak, podstawą prac są kierunki działań nakreślone w krajowych i międzynarodowych politykach, strategiach i innych dokumentach, w tym specustawach	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Etap przygotowania	etap koncepcji	przegląd lokalizacji (ang. *Site screening*)	na podstawie materiałów archiwalnych dotyczących geologii analizuje się regiony geograficzne lub baseny sedymentacyjne i wskazuje obszary perspektywiczne do kolejnego etapu z uwzględnieniem kryteriów lokalizacyjnych	raport z przeglądu struktur ranking lokalizacji	brak, etap ten może zostać pominięty, jeśli lokalizacja obiektu jest ustalona	n.d.	zebranie, przegląd, analiza i ocena materiałów archiwalnych w tym: danych z wierceń, badań geofizycznych, opracowań regionalnych, map, danych złożowych i górniczych itp.	wizja terenowa	zalecane: profilowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych	modele statyczne (parametryczno-strukturalne)
		wybór lokalizacji (ang. *Site selection*)	na podstawie raportu z przeglądu lokalizacji oraz ewentualnie wyników nowych badań dokonuje się oceny obszarów perspektywicznych i wybiera potencjalne lokalizacje (struktury) dla składowania/magazynowania z uwzględnieniem kryteriów lokalizacyjnych	projekt robót geologicznych* dokumentacja geologiczna inna lub dokumentacja geologiczna złoża* raport z wyboru struktury studium wykonalności	brak, etap ten może zostać pominięty, jeśli lokalizacja obiektu jest ustalona	n.d.	aktualizacja zebranych danych archiwalnych w tym: danych z wierceń, badań geofizycznych, opracowań regionalnych, map, danych złożowych i górniczych itp.	kartowanie geologiczne; badania geofizyczne (2D); wiercenia w minimalnym zakresie	zalecane: profilowanie rdzeni wiertniczych; badania fizyczne i mechaniczne w minimalnym zakresie	modele dynamiczne podstawowe
					w przypadku wykonywania prac i robót geologicznych Prawo geologiczne i górnicze i akty wykonawcze	koncesja na poszukiwania lub rozpoznawania złóż kopalin** koncesja na poszukiwania lub rozpoznawania kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla decyzja zatwierdzająca projekt robót geologicznych* decyzja przyjmująca dokumentację geologiczną inną lub zatwierdzająca dokumentację geologiczną złoża*				

Tabela 33 cd.

1			2	3	4	5	6	7	8	9
Etap przygotowania	etap projektowania	charakterystyka lokalizacji (ang. *Site characterisation*)	na podstawie raportu z wyboru struktury lub dokumentacji geologicznej innej lub dokumentacji geologicznej złoża dokonuje się ostatecznego wyboru lokalizacji do dalszych prac projektowych i wykonuje się wszelkie niezbędne badania do uzyskania charakterystyki lokalizacji obiektu	projekt robót geologicznych; dokumentacja geologiczno-inżynierska; dokumentacja hydrogeologiczna	brak; w przypadku posiadania bardzo dużej ilości danych wystarczających do prowadzenia prac projektowych (bardzo rzadki przypadek)	n.d.	aktualizacja zebranych danych archiwalnych w tym: danych z wierceń, badań geofizycznych, opracowań regionalnych, map, danych złożowych i górniczych itp.	badania geofizyczne (3D); wiercenia; badania geofizyczne otworowe; ocena stanu technicznego (jeśli dotyczy); pomiary przemieszczeń (jeśli dotyczy); badania monitoringowe (stan zero)	wymagane: profilowanie rdzeni wiertniczych; analiza petrograficzna; badania fizyczne i mechaniczne gruntów i skał; badania przepuszczalności; badania chemiczne gruntów, skał i wody	modele dynamiczne złożone
					w przypadku wykonywania prac i robót geologicznych Prawo geologiczne i górnicze i akty wykonawcze	koncesja na poszukiwania lub rozpoznawania złóż kopalin**; koncesja na poszukiwania lub rozpoznawania kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla; decyzja zatwierdzająca projekt robót geologicznych; decyzje zatwierdzające dokumentację geologiczno-inżynierską oraz hydrogeologiczną				
		koncesja	złożenie wniosku do ministra właściwego ds. środowiska	wniosek koncesyjny; raport oddziaływania na środowisko; dokumentacja techniczno-ruchowa (w zależności od potrzeb: plan ruchu, projekt zagospodarowania złoża, plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla); dowód istnienia prawa do korzystania z informacji geologicznej (jeśli wykorzystana); uzgodnienie przez wójta (burmistrza lub prezydenta miasta) pod kątem zgodności z miejscowym planem lub studium; zawarcie umowy ustanowieniu użytkowania górniczego; ustanowienie zabezpieczenia roszczeń (jeśli wymagane)	Prawo geologiczne i górnicze; Prawo ochrony środowiska	decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach; koncesja na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji, podziemne składowanie odpadów lub podziemne składowanie dwutlenku węgla; koncesja na wydobywanie kopalin ze złóż***	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabela 33 cd.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Etap przygotowania etap projektowania projekt budowlany	opracowanie projektów budowlanych, map	mapa do celów projektowych; projekt architektoniczno-budowlany; projekt techniczny	Prawo geologiczne i górnicze (w zakresie obiektów zakładu górniczego i wyrobiska); Prawo budowlane	plan ruchu zakładu górniczego i jego zatwierdzenie przez właściwy miejscowo Okręgowy Urząd Górniczy; pozwolenie na budowę	analiza danych pod kątem ich wystarczalności i przydatności do projektowania	ewentualne badania uzupełniające i/lub geotechniczne i/lub monitoringowe	ewentualne badania uzupełniające gruntów skał i wody	modele dynamiczne złożone
Etap budowy	wykonanie lub udostępnienie istniejącego wyrobiska górniczego oraz obiektów towarzyszących obiektu oraz zagospodarowanie złoża kopaliny (jeśli dotyczy)	składowisko/magazyn składający się z części podziemnej i naziemnej	Prawo geologiczne i górnicze (w zakresie obiektów zakładu górniczego i wyrobiska); Prawo budowlane	pozwolenie na użytkowanie; instrukcja prowadzenia składowiska odpadów	n.d.	badania monitoringowe	badania monitoringowe	n.d.
Etap eksploatacji	uruchomienie i użytkowanie obiektu	bezpieczne użytkowanie obiektu; aktualizacja planów ruchu, projektów zagospodarowania złoża, planu zagospodarowania podziemnego składowiska CO_2 i innych dokumentów (jeśli wymagane) pod warunkiem zgodności z koncesją	Prawo geologiczne i górnicze (w zakresie obiektów zakładu górniczego); Prawo budowlane	obowiązki związane ze sprawozdawczością oraz z przekazywaniem informacji wynikające z ustawy pgg dotyczące m.in. opłat, ewidencji i bilansu zasobów złóż kopalin, zmiany planu zagospodarowania podziemnego składowiska CO_2, sporządzaniem dokumentacji mierniczo-geologicznej, oceny zagrożeń itp. oraz związane z ratownictwem górniczym i rejestrowaniem strumienia (w przypadku CO_2); zezwolenia kierownika ruchu dotyczące oddania do ruchu maszyn, urządzeń i elementów konstrukcyjnych magazynu/składowiska	n.d.	badania monitoringowe	badania monitoringowe	n.d.

Tabela 33 cd.

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Etap poeksploatacyjny	Etap likwidacji	Prace związane z likwidacją zakładu górniczego (w tym prace zabezpieczające, rekultywacyjne itp.).	Zlikwidowane składowisko/magazyn	Prawo geologiczne i górnicze; Ustawa o ochronie gruntów rolnych i leśnych (w przypadku rekultywacji)	pozwolenie na zamknięcie składowiska odpadów; pozwolenia na zamknięcie składowiska CO_2; plan ruchu likwidowanego zakładu górniczego – wraz z zatwierdzeniem; decyzja organu nadzoru górniczego o likwidacji zakładu lub jego części (jeśli dotyczy); obowiązki związane z przekazaniem dokumentacji mierniczo-geologicznej organowi nadzoru górniczego	n.d.	badania monitoringowe	badania monitoringowe	n.d.
	Etap monitoringu	Prace związane z kontrolą stanu środowiska po zamknięciu obiektu	Monitoring zlikwidowanego zakładu górniczego (w przypadku składowiska CO_2 przez okres nie krótszy niż 20 lat od jego zamknięcia).	Prawo geologiczne i górnicze	obowiązki związane z przechowywaniem dokumentów wynikające z ustawy pgg	n.d.	badania monitoringowe	badania monitoringowe	n.d.

* jeżeli będą wykonywane roboty geologiczne

** jeżeli obiekt ma być zlokalizowany w złożu kopaliny

*** jeżeli tworzeniu wyrobiska będzie towarzyszyło wydobycie kopaliny – zapis wynika z projektu ustawy (Projekt..., 2022)

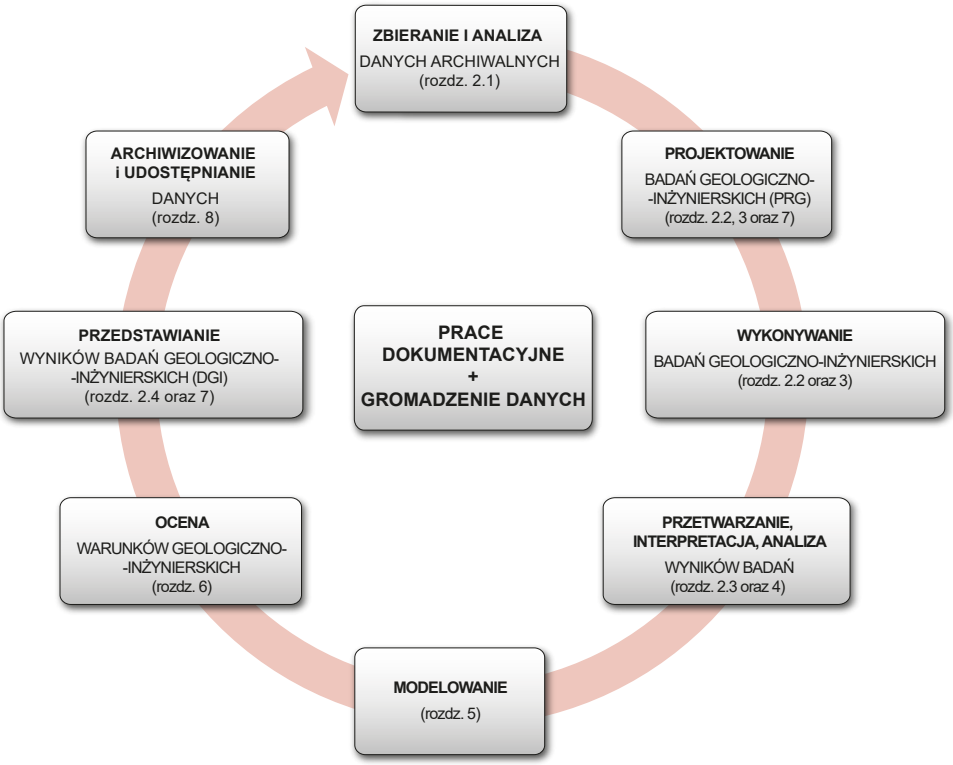
n.d. – nie dotyczy

2. DOKUMENTOWANIE GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

Celem dokumentowania geologiczno-inżynierskiego jest określenie warunków geologiczno-inżynierskich w górotworze na potrzeby realizacji obiektu podziemnego wraz z prognozą zmian w wyniku jego budowy i eksploatacji (a także ewentualnej likwidacji). Dokumentowanie geologiczno-inżynierskie to proces złożony, mający na celu dostarczenie wszelkich danych niezbędnych do zaprojektowania obiektu, tj. uwzględniających wszystkie zidentyfikowane czynniki, które mają wpływ na bezpieczne funkcjonowanie obiektu podziemnego. Wynikiem dokumentowania geologiczno-inżynierskiego jest **dokumentacja geologiczno-inżynierska** (DGI), która (także jako dodatek) może być wykonywana na każdym etapie realizacji inwestycji, natomiast musi zostać opracowana na etapie udzielania koncesji (patrz: cz. II, rozdz. 1). Informacje i dane w niej zawarte są wykorzystywane na etapie projektowania obiektu do podejmowania decyzji dotyczących rozwiązań technicznych.

Prace dokumentacyjne rozpoczynają się od zebrania dostępnych danych archiwalnych połączonych z wizją terenową. Posiadając informacje archiwalne, można odpowiednio określić czynniki mające wpływ na obiekt podziemny, zaprojektować badania, w tym dobrać optymalne techniki badań, ich zakres oraz metodykę. Efekty tych prac przedstawia się w **projekcie robót geologicznych** (PRG), którego zawartość szczegółowo opisano w rozdziale 7.1 (cz. II). Na jego podstawie wykonuje się odpowiednie badania w terenie oraz w laboratorium. Po etapie projektowo-wykonawczym należy przystąpić do przetwarzania, modelowania i interpretacji wyników badań – wszystko umieszcza się w DGI, jej zawartość, w zależności od rodzaju, szczegółowo opisano w rozdziałach 7.2 i 7.3 (cz. II). W celu umożliwienia obiegu danych i ułatwienia do nich dostępu kolejnym uczestnikom procesu inwestycyjnego, wszystkie efekty prac dokumentacyjnych powinny być archiwizowane i gromadzone w bazie danych, w odpowiednio do tego przygotowanym miejscu (np. w chmurze, na serwerze, na dysku komputera wraz z kopią na zewnętrznym nośniku danych, w segregatorze itp.) – patrz: cz. II, rozdz. 9. Schemat dokumentowania ukazano na rysunku 57.

Zakres analizy materiałów archiwalnych, jak i zakres badań zaprojektowanych na potrzeby realizacji inwestycji,



Rys. 57. Zakres prac dokumentacyjnych dla obiektu podziemnego

Uwaga: wszystkie numery rozdziałów podane na rysunku dotyczą części II poradnika

zależy w znacznym stopniu od rodzaju struktury oraz obiektu podziemnego, a tym samym od zestawu czynników geologicznych i technicznych mających wpływ na bezpieczne zaprojektowanie obiektu podziemnego. Badania należy opracować tak, żeby dostarczyć danych niezbędnych do spełnienia wymagań dotyczących zakresu DGI, której zawartość określono w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz w rozdziałach 7.2 i 7.3 (cz. II). Uzyskane dane powinny też umożliwić opracowanie modelu geologicznego. W kolejnych podrozdziałach pokrótce opisano każdy z etapów dokumentowania.

2.1. ZBIERANIE I ANALIZA DANYCH ARCHIWALNYCH

Zbieranie i analiza danych archiwalnych to pierwszy i zarazem bardzo ważny etap prac dokumentacyjnych. Jego zakres i czasochłonność będzie zależała od etapu realizacji inwestycji (czy jest to etap przeglądu, wyboru czy charakterystyki lokalizacji), rodzaju obiektu oraz ilości danych wynikających z dotychczasowego stopnia zagospodarowania górotworu.

Zebraniu i analizie powinny podlegać w szczególności:

– **dane geologiczne**, opisujące strukturę geologiczną, litologię i petrografię skał oraz tektonikę górotworu z uwzględnieniem analizy regionalnej, w tym warunków geologiczno-inżynierskich (np. dane otworowe, przekroje, mapy);
– **dane geodynamiczne**, obejmujące stan współczesnych naprężeń tektonicznych (Jarosiński, 1994, 2005, 2006a, b; Jarosiński i in., 2007; Bogusz i in., 2013) oraz aktualną i historyczną aktywność sejsmiczną (np. dane z monitoringu geodynamicznego prowadzonego przez PIG-PIB, dane z polskiej sieci sejsmologicznej prowadzonej przez IGF-PAN, a także mapy i bazy wstrząsów sejsmicznych i hazardu sejsmicznego);
– **dane geomechaniczne**, opisujące wyniki pomiarów wielkości i kierunków naprężeń głównych, właściwości mechaniczne skał i masywu skalnego (np. wyniki badań próbek skalnych z głębokich otworów wiertniczych, dane z monitoringu górotworu, wyniki testów szczelinowania itp.);
– **dane hydrogeologiczne**, opisujące warunki hydrogeologiczne, w tym: poziomy wodonośne, sposób zasilania warstw wodonośnych, kierunek migracji wód podziemnych, przepuszczalność górotworu, zagrożenia związane z kontaktem z wodami powierzchniowymi i głównymi zbiornikami wód podziemnych (np. dane z monitoringu piezometrycznego);
– **dane geochemiczne**, określające właściwości chemiczne wody i skał/gruntów wraz z oceną możliwych reakcji chemicznych z substancjami planowanymi do bezzbiornikowego magazynowania lub odpadami planowanymi do składowania (np. wyniki badań fizykochemicznych wód);
– **dane geofizyczne**, obrazujące strefy spękań w górotworze, wskazujące lokalizację uskoków, zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych w górotworze wraz z oceną oddziaływań dynamicznych na jego stabilność, wykorzystywane do budowania modeli budowy geologicznej (np. dane sejsmiki powierzchniowej, dane geofizyki otworowej);
– **dane górnicze**, informujące o rodzaju prowadzonej działalności górniczej, przestrzennym zasięgu eksploatacji i historycznych granicach możliwego wpływu działalności górniczej na górotwór i infrastrukturę naziemną (np. dane dotyczące amplitudy wstrząsów indukowanych, mapy prognozowanych osiadań, dane z monitoringu geodezyjnego itp.);
– **dane geodezyjne**, w szczególności teledetekcyjne i satelitarne informujące o ewentualnych przemieszczeniach terenu.

Dane te pozyskuje się najczęściej w formie:

– map (geologicznych i in.);
– przekrojów geologicznych;
– profili geofizycznych;
– profili otworów wiertniczych;
– archiwalnych rdzeni wiertniczych;
– dokumentacji archiwalnych (geologicznych i in.);
– baz danych;
– danych przestrzennych;
– danych z monitoringu;
– danych z kopalń;
– publikacji i monografii.

Część danych jest ogólnodostępna (wyszukiwarki internetowe, geoportale lub internetowe bazy danych), można je dowolnie przeglądać i wykorzystywać do analiz. Pozostałe są objęte przepisami lub wewnętrznymi procedurami dotyczącymi ich udostępniania (np. **informacja geologiczna**), albo stanowią własność przedsiębiorstwa i można je zakupić. Są także takie, które nie są udostępniane innym podmiotom z uwagi na duże koszty ich wytworzenia oraz tajemnice przedsiębiorstwa.

Źródłem ww. informacji i danych są w szczególności:

– dane otworowe przechowywane w Narodowym Archiwum Geologicznym (NAG) (karty otworów oraz rdzenie wiertnicze);
– mapy regionalne, szczegółowe, seryjne, tematyczne (tektoniczne, geologiczne, geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne, geochemiczne itp.) oraz atlasy geologiczne;
– stare opracowania regionalne (analizy, studia, monografie);
– serwisy mapowe (geoportale ogólnokrajowe, lokalne oraz tematyczne);
– geologiczne bazy danych PIG-PIB:
  • złożowe (MIDAS),
  • geologiczno-inżynierskie (BDGI, BDGI-WFM, MPGN, BDGN),
  • hydrogeologiczne (CBDH, BWM) itp.;
– Baza Danych Geomechanicznych (Pinińska, 2004a, Pinińska i in., 2008; Domonik i in., 2009, 2010);

– wyszukiwarki danych i przeglądarki danych przestrzennych PIG-PIB, w szczególności:
  • https://geologia.pgi.gov.pl/,
  • https://gis.pgi.gov.pl/,
  • https://dm.pgi.gov.pl/,
  • https://otworywiertnicze.pgi.gov.pl/,
  • https://dokumenty.pgi.gov.pl,
– geologiczne dokumentacje archiwalne przechowywane w NAG i innych archiwach;
– dokumentacje techniczne, mierniczo-geologiczne, techniczno-ruchowe, plany ruchu, projekty zagospodarowania złoża i inne dokumenty przechowywane przez zakłady górnicze;
– opinie i ekspertyzy (np. górnicze, geotechniczne);
– nowe projekty i publikacje naukowe;
– numeryczne modele geologiczne opracowywane przez instytucje państwowe i przedsiębiorstwa prywatne;
– instytucje, jak i przedsiębiorcy, prowadzące monitoringi (hydrogeologiczne, geodynamiczne, sejsmiczne) lub opracowujące mapy zagrożeń (powodziowych, sejsmicznych itp.);
– archiwa i biblioteki oraz strony internetowe wydawnictw, bibliotek, archiwów itp.

Część powyższych danych stanowi informację geologiczną w rozumieniu ustawy pgg, do której prawa przysługują Skarbowi Państwa. Są to np. dokumentacje geologiczne, dane z otworów wiertniczych służących rozpoznaniu budowy głębokiego podłoża lub wykonania regionalnych badań budowy geologicznej kraju, dane geofizyczne, dane dotyczące złóż objętych własnością górniczą. W wielu przypadkach korzystanie z informacji geologicznej jest nieodpłatne, ale na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla korzystanie z informacji geologicznej następuje w drodze umowy, za wynagrodzeniem. Dotyczy to również badań powodujących niezbędne dla osiągnięcia celu uszkodzenie, zniszczenie lub zużycie próbki rdzeni wiertniczych zgromadzonych w NAG. Dla tych przedsiębiorców, którzy ponieśli koszt pozyskania danej informacji geologicznej ustawodawca przewidział prawo do nieodpłatnego korzystania z niej, a ci którzy ubiegają się o wykonywanie działalności w zakresie podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla przez trzy lata od dnia doręczenia decyzji zatwierdzającej dokumentację geologiczną mają do niej wyłączne prawo.

Największy zasób danych geologicznych znajduje się w PIG-PIB, który na mocy ustawy pgg, w ramach zadań państwowej służby geologicznej, prowadzi centralne archiwum geologiczne oraz gromadzi, udostępnia, przetwarza i archiwizuje informację geologiczną. Należy podkreślić, że jakość tych danych jest różna i zależy od okresu prowadzenia badań. Dane bardzo stare są najczęściej w formie analogowej i wymagają pracochłonnego przygotowania do obróbki cyfrowej. Część danych jest na bieżąco cyfrowana przez PIG-PIB w ramach zadań państwowej służby geologicznej i mogą być one już wykorzystywane do analiz numerycznych. Najnowsze dane są już cyfrowe i można je pozyskać zarówno w postaci przetworzonej, jak i surowej do własnych analiz.

Czynności, które odróżniają analizę materiałów archiwalnych dla typowych obiektów budowlanych od analizy dla podziemnego magazynowania lub składowania to: **profilowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych**, **kalibracja danych geofizyki otworowej** oraz **analiza i reinterpretacja profili sejsmicznych**. Oczywiście na bardzo wczesnych etapach (przeglądu lokalizacji) wystarczy pozyskać informacje o istnieniu tych danych, wstępnie ocenić ich przydatność oraz dokonać ich analizy pod kątem czynników wykluczających. Natomiast na późniejszych etapach (zwłaszcza charakterystyki lokalizacji) jest wymagana ich szczegółowa interpretacja, głównie w zakresie identyfikacji granic sejsmicznych i powiązaniu ich z litologią z otworu oraz zlokalizowania głównych i podrzędnych uskoków.

Z uwagi na wysokie koszty wykonywania głębokich otworów wiertniczych, każdy taki otwór, przechowywany w archiwum rdzeni NAG, nawet odwiercony bardzo dawno, stanowi cenne źródło danych niezależnie od celu jego wykonania. Dlatego też bardzo ważnym elementem analizy i interpretacji materiałów archiwalnych jest **profilowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych** i struktur tektonicznych we wszystkich otworach w lokalizacji, a także w zależności od potrzeb w otworach sąsiadujących (patrz: cz. II, rozdz. 3.3.1). Zaleca się wykonanie dokumentacji fotograficznej wszystkich profilowanych rdzeni, chyba że już to zrobiono. Do analizy można wykorzystać także skanery rdzeni wiertniczych w celu interpretacji kierunków współczesnych naprężeń tektonicznych S_{Hmax} (Jarosiński, 1994, 2005, 2006a, b). W przypadku bardziej złożonych struktur sedymentacyjnych, które mogą wpływać na niejednorodność przepuszczalności, zeskanowanie powierzchni rdzenia pozwala na wykonanie przestrzennego modelu rozkładu poszczególnych jednostek. Na podstawie profilowań rdzenia przeprowadza się także **kalibrację danych geofizyki otworowej** i jej zintegrowanie z danymi otworowymi (patrz: cz. II, rozdz. 3.3.2). Najpowszechniejszym rodzajem profilowania w starszych otworach jest karotaż naturalnego promieniowania gamma, wykorzystywany do generalnej charakterystyki litologii skał w otworze (np. do określenia udziału piaskowców i łupków/iłowców). Na wstępnych etapach badań, zarówno na etapie wyboru, jak i charakterystyki lokalizacji (rzadziej na etapie przeglądu lokalizacji), także z uwagi na wysokie koszty pozyskania danych geofizycznych (sejsmiki 2D i 3D), analizie poddaje się również wszystkie dostępne i możliwe do uzyskania **profile sejsmiczne**. Ze względu na często inny cel archiwalnych interpretacji (np. złożowy), profile te poddaje się ponownej interpretacji (reinterpretacji), a czasem także ponownemu przetworzeniu (reprocessing) surowych danych (patrz: cz. II, rozdz. 3.2). Dzięki nowoczesnym technikom przetwarzania jest możliwe uzyskanie lepszego niż kiedyś obrazu geofizycznego. Dodatkowym analizom można poddać także istniejące dane grawimetryczne.

Kolejnym źródłem danych na temat właściwości geomechanicznych skał Polski jest Baza Danych Geomechanicznych

utworzona w Zakładzie Geomechaniki Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego (Pinińska, 2004a, 2009; Pinińska i in., 2008; Domonik i in., 2009, 2010). Zgromadzono w niej ok. 300 000 informacji, w tym danych parametrycznych skał z obszaru Polski oraz szeroki zestaw danych opisowych i graficznych. Zintegrowana lokalizacja obiektów bazy i ich atrybutów wg współrzędnych geograficznych zezwala na przestrzenną (terenową i kartograficzną) i geologiczną (litostratygraficzną i strukturalną) lokalizację poszczególnych elementów treści bazy danych. Baza ta zawiera informacje pozyskane bezpośrednio z badań wykonywanych na Wydziale Geologii UW, ale także dane archiwalne, związane z budową zakończonych inwestycji i zlikwidowanych kopalń.

Na wstępnych etapach dokumentowania, w przypadku braku materiałów z rozważanych lokalizacji, na zasadzie analogii można sięgnąć po dane z sąsiednich otworów lub z obiektów zlokalizowanych w podobnych strukturach, kierując się wiedzą o ciągłości poszczególnych struktur lub formacji, ich właściwościach oraz o charakterze ich zmienności.

Należy ponadto zaznaczyć, że niezwykle cennym źródłem danych są publikacje naukowe (artykuły, monografie), których analiza jest nieodzownym elementem procesu dokumentowania geologiczno-inżynierskiego. Przegląd pozycji literaturowych, mogących zawierać istotne informacje na temat budowy geologicznej, a przede wszystkim parametrów gruntów i skał, pomaga w zbudowaniu odpowiedniego modelu geologicznego i doboru odpowiednich metod badawczych. Szczególnie istotne są tu katalogi właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał w ujęciu regionalnym (Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b).

Wyniki analizy materiałów archiwalnych służą zarówno zaprojektowaniu zakresu, jak i rodzaju badań. Po interpretacji, powinny być wykorzystane w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej w połączeniu z nowymi danymi pozyskanymi z bieżących badań.

2.2. PROJEKTOWANIE I WYKONYWANIE BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Projektowanie badań geologiczno-inżynierskich powinno wynikać z analizy materiałów archiwalnych oraz analizy czynników geologicznych koniecznych do uwzględnienia podczas realizacji inwestycji (patrz: cz. I, rozdz. 4). Przy projektowaniu badań terenowych warto przeprowadzić także wizję terenową, której głównym celem jest określenie możliwości wykonania zaprojektowanych badań w danym miejscu (czy nie ma ograniczeń technicznych, prawnych, terenowych lub społecznych). Z uwagi na rozległość prac wiertniczych (głębokie otwory), lokalizacja odwiertu powinna być dobrana tak, żeby jak najbardziej zminimalizować jego oddziaływanie na środowisko. Zaleca się także wykorzystanie wyników badań geofizycznych (jeżeli są dostępne) do lokalizowania miejsc otworów wiertniczych.

Na etapie **przeglądu lokalizacji** zazwyczaj nie projektuje się nowych badań (tab. 32). Do analiz wykorzystuje się wszelkie zebrane materiały archiwalne (patrz: rozdz. 2.1). Etap ten skupia się przede wszystkim na danych, które pozwolą stwierdzić, czy w danej lokalizacji nie istnieją przesłanki wykluczające jej wybór na magazyn lub składowisko. Na tym etapie z reguły nie przeprowadza się profilowania archiwalnych rdzeni wiertniczych lub reinterpretacji danych geofizycznych, gdyż dostęp do tych danych jest kosztowny.

Na etapie **wyboru lokalizacji** dokonuje się ponownego przeglądu danych archiwalnych (głównie pod kątem weryfikacji czy pojawiły się nowe informacje) oraz szczegółowej analizy archiwalnych rdzeni wiertniczych, w tym także badań na próbkach pobranych z rdzenia oraz analizy danych geofizyki otworowej. Wykorzystywane są również dane geofizyczne (głównie sejsmiczne), które w zależności od potrzeb są poddawane ponownej reinterpretacji lub reprocessingowi. Jeśli dane geofizyczne nie są dostępne, wówczas wykonuje się badania sejsmiczne 2D. Na tym etapie zaleca się przeprowadzić wstępne kartowanie geologiczne pod kątem możliwości zlokalizowania obiektów części naziemnej inwestycji.

Kluczowy jest etap **charakterystyki lokalizacji**. Dane tu pozyskane muszą umożliwić opracowanie zarówno modelu strukturalno-parametrycznego górotworu, jak i złożonych modeli dynamicznych przedstawiających wpływ realizacji obiektu, zmiany jego geometrii oraz procesu zatłaczania substancji lub odpadu do obiektu podziemnego (patrz: cz. II, rozdz. 5). Charakterystyce powinna podlegać część podziemna i naziemna lokalizacji. Oprócz aktualizacji informacji dotyczących danych archiwalnych, na tym etapie należy zaprojektować:

- szczegółowe kartowanie geologiczno-inżynierskie;
- wiercenia i pobór próbek;
- otworowe badania geofizyczne i specjalne;
- sondowania geologiczno-inżynierskie (dla części naziemnej);
- powierzchniowe badania geofizyczne (2D lub 3D);
- analizy petrograficzne;
- laboratoryjne badania fizyczne i mechaniczne gruntów i skał;
- badania chemiczne gruntów, skał i wody;
- badania stanu technicznego istniejących otworów, szybów lub wyrobisk (jeżeli dotyczy).

Jest to etap, na którym muszą powstać także wstępne założenia do monitoringu obiektu (geodezyjnego, geochemicznego, hydrogeologicznego).

Zaprojektowane badania mają dostarczyć takich danych, które pozwolą opisać budowę geologiczną wybranej struktury (warunki geologiczno-strukturalne i geodynamiczne), warunki hydrogeologiczne oraz ustalić i ocenić warunki geologiczno-inżynierskie (geomorfologiczne, geologiczno-złożowe, geotermalne, geomechaniczne), a także dostarczą informacji o warunkach geologiczno-górniczych (tab. 34). Do tego celu zaleca się wykorzystać metody badawcze szczegółowo opisane w rozdziale 3 (cz. II).

W przypadku badań na potrzeby podziemnego magazynowania lub składowania większość prac terenowych będzie robotą geologiczną w rozumieniu ustawy pgg i będzie wymagać opracowania PRG, a w przypadku otworów wiertniczych także planów ruchu zakładu górniczego z uwagi na fakt, że są one głębsze niż 100 m.

Na etapie realizacji badań geologiczno-inżynierskich należy dbać o najwyższą ich jakość. Powinny być one wykonywane zgodnie z obowiązującymi przepisami i dokumentami odniesienia (projektami robót, planami ruchu, procedurami w kopalni itp.) oraz zalecanymi i aktualnymi normami, po to, żeby uzyskane wyniki były wiarygodne i mogły być wykorzystywane na kolejnych etapach realizacji inwestycji.

2.3. PRZETWARZANIE, MODELOWANIE, INTERPRETACJA, ANALIZA I OCENA WYNIKÓW BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Przetwarzanie, modelowanie i interpretacja wyników badań to złożony zestaw czynności, polegający na odpowiednim przygotowaniu zebranych danych do analizy i oceny, znalezieniu zależności pomiędzy wybranymi zbiorami danych, klasyfikacji oraz nadaniu im formy w zależności od celu badań. W efekcie tych czynności formułowane są wnioski, na podstawie których możliwe jest zaprojektowanie obiektu podziemnego.

Tabela 34

Przykłady badań koniecznych do zaprojektowania na potrzeby oceny różnego rodzaju warunków geologicznych

Czynniki geologiczne	Przykłady badań
Warunki geologiczno-strukturalne i geodynamiczne	• analiza materiałów archiwalnych (map geologicznych, tektonicznych, geodynamicznych, złożowych, sejsmicznych, przekrojów geologicznych, dokumentacji archiwalnych, archiwalnych rdzeni wiertniczych) • wiercenia i pobór próbek do badań laboratoryjnych • analizy rdzenia wiertniczego • analizy petrograficzne • badania cech fizycznych gruntów i skał • badania geofizyczne powierzchniowe (2D lub 3D) • badania geofizyczne otworowe
Warunki hydrogeologiczne	• analiza materiałów archiwalnych (dokumentacji geologicznych, map hydrogeologicznych i geochemicznych, danych z monitoringu) • pomiary hydrogeologiczne w piezometrach • pobór próbek wody do badań laboratoryjnych • analizy fizykochemiczne wody
Warunki geomorfologiczne	• analiza materiałów archiwalnych (map topograficznych, map geologicznych oraz geomorfologicznych, przekrojów geologicznych oraz zdjęć satelitarnych) • szczegółowe kartowanie geologiczno-inżynierskie form geomorfologicznych
Warunki geomechaniczne	• analiza materiałów archiwalnych (dokumentacji archiwalnych, danych z monitoringu geomechanicznego, badań geofizycznych) • wiercenia i pobór próbek do badań laboratoryjnych • testy szczelinowania • pomiary przemieszczeń w tym konwergencji (w przypadku istniejących zakładów górniczych)
Warunki geotermalne	• analiza materiałów archiwalnych (map geotermalnych, dokumentacji geologicznych) • badania otworowe (pomiary temperatury)
Warunki geologiczno-złożowe	• analiza materiałów archiwalnych (map tektonicznych i złożowych, dokumentacji geologicznych, projektów zagospodarowania złoża, archiwalnych rdzeni wiertniczych) • wiercenia i pobór próbek do badań laboratoryjnych • badania geofizyczne otworowe • badania geofizyczne powierzchniowe (2D lub 3D)
Warunki geologiczno-inżynierskie	• analiza materiałów archiwalnych (map i atlasów geologiczno-inżynierskich, dokumentacji geologicznych, przekrojów geologicznych, archiwalnych rdzeni wiertniczych, wyników badań próbek) • szczegółowe kartowanie geologiczno-inżynierskie możliwych zagrożeń w lokalizacji • wiercenia i pobór próbek do badań laboratoryjnych • analizy rdzenia wiertniczego • badania właściwości fizycznych gruntów i skał • badania właściwości mechanicznych gruntów i skał • sondowania (dla części naziemnej)
Warunki geologiczno-górnicze	• analiza materiałów archiwalnych (dokumentacji geologicznych, mierniczo-geologicznych, projektów zagospodarowania złoża, planów ruchu, prognoz górniczych, danych z monitoringu, archiwalnych rdzeni wiertniczych) • badania geofizyczne otworowe • badania stanu technicznego istniejących otworów (w tym stanu zacementowania) • badania stanu technicznego szybów i wyrobisk (w przypadku kopalń)

Przetwarzanie danych polega na ich ręcznym lub (częściej) automatycznym przejrzeniu pod kątem przydatności i wiarygodności. W tym celu stosuje się często odpowiednie (automatyczne, półautomatyczne lub ręczne) filtry. Przetwarzaniu podlegają najczęściej dane surowe, które wymagają analizy, wprowadzenia stosownych poprawek, filtrów itp. Jest to istotny etap, ponieważ pozwala wyeliminować dane błędne lub przypadkowe oraz stanowi etap przygotowawczy do interpretacji i analizy danych pod kątem wiarygodności i przydatności. Przetwarzanie danych jest szczególnie istotne w przypadku danych geofizycznych. Wykonuje się wiele czynności przygotowawczych, m.in.: przeformatowanie danych z plików surowych SEG, znakowanie pierwszych wstąpień, wyliczenie poprawek statycznych w kilku iteracjach, migracja czasowa, tłumienie lub usuwanie zakłóceń, filtracja itp.

Interpretacja danych jest prowadzona w celu sparametryzowania badanego ośrodka i jego otoczenia zarówno pod kątem jakościowym (np. geometria i rozprzestrzenienie struktury), jak i ilościowym (np. parametry fizyczno-mechaniczne warstw). Interpretację danych przeprowadza się na podstawie np. wzorów empirycznych, nomogramów, macierzy, dokumentów normatywnych, metod geostatystycznych (ekstrapolacja, interpolacja, alokacja), korelacji, modelowania oraz doświadczenia zespołu osób dokonujących interpretacji, często z zastosowaniem zaawansowanych programów interpretacyjnych. Każda z metod wymaga uzasadnienia jej wyboru, jak i sprawdzenia jej przydatności dla konkretnego celu. Innymi słowy, wynikiem interpretacji danych jest przejście z danej surowej na interesujący nas parametr. Parametrem może być zarówno np. geometria, jak i właściwość fizyczno-mechaniczna. Aby ten parametr był pozbawiony błędów i jak najbardziej zbliżony do rzeczywistości, interpretację powinien wykonywać zespół osób posiadających odpowiednie doświadczenie.

Modelowanie numeryczne polega na opracowaniu modelu górotworu, który będzie stanowić uproszczony obraz ośrodka geologicznego, obiektu podziemnego i jego otoczenia, w formie algorytmów umożliwiających fizyczną charakterystykę zachodzących w nim procesów. Tworzenie modelu opiera się na systemie założeń, pojęć i zależności między poszczególnymi cechami górotworu i ma na celu, w sposób przybliżony, przedstawić określoną przestrzeń podziemną i zrozumieć jakie zachodzą w niej procesy i zjawiska w wyniku budowy i eksploatacji obiektu podziemnego. Tworzenie modelu i jego stopień skomplikowania może się zmieniać w zależności od etapów inwestycji (patrz: cz. II, rozdz. 5).

Analiza danych z kolei prowadzi do wizualizacji danego problemu lub odpowiedzi na zadane pytanie w celu sformułowania istotnych wniosków. Analizować można pojedyncze, zinterpretowane wyniki badań, zbiory wyników oraz wzajemne zależności pomiędzy nimi. W przypadku badań pod obiekty podziemne niezwykle istotna jest konieczność uzyskania jak najwyższego stopnia integracji danych z analizowanych otworów i badań geofizycznych. Stosuje się do tego specjalistyczne oprogramowanie do tworzenia modeli przestrzennych. Można w nich zintegrować wyniki interpretacji sejsmicznej z interpretacją litostratygraficzną i w ten sposób uzyskać przestrzenny rozkład analizowanych parametrów. O ile dobrą integrację danych zapewniają specjalistyczne programy komputerowe, o tyle zintegrowana i interdyscyplinarna interpretacja tych danych zależy od doświadczenia zespołu interpretującego. W tym celu konieczne jest zorganizowanie zespołu mającego w swym składzie specjalistów od sedymentologii, tektoniki, petrofizyki/petrologii, geofizyki otworowej, geofizyki pól potencjalnych, profilowania sejsmicznego, sejsmologii, teledetekcji, geodynamiki, geologii inżynierskiej, hydrogeologii itp. W dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim istotnym aspektem jest także interpretacja danych przestrzennych przez wzajemne ich korelowanie. Dla przykładu, analiza dokonana na podstawie numerycznego modelu terenu, kartowania geologiczno-inżynierskiego, danych z wierceń otworowych, sondowań geotechnicznych i danych geofizycznych umożliwia za pomocą metod geostatystycznych określenie zasięgu przestrzennego interpretowanej cechy, np.:

- wyznaczanie form geomorfologicznych;
- wyznaczanie granic i zasięgu warstw skał zbiornikowych;
- wyznaczanie rozkładu miąższości warstw izolujących;
- wyznaczanie położenia głębokości do zwierciadła wód podziemnych.

Opierając się na interpretacji i analizie danych sejsmicznych, generuje się mapy czasowe i głębokościowe dla wyinterpretowanych horyzontów, mapy rozkładu prędkości fal sejsmicznych dla wydzielonych kompleksów prędkościowych (a następnie wydzieleń geologicznych), a także mapy strukturalne lub tematyczne (np. kształt wysadu solnego lub czapy gipsowej, na wybranych głębokościach).

Analizy te umożliwiają stworzenie map i modelu geologicznego, w tym 3D (np. obraz przestrzenny wysadu solnego), obrazującego budowę geologiczną w przestrzeni wyznaczonej do lokalizacji inwestycji. Do analizy danych można wykorzystać narzędzia GIS, co zostało szczegółowo opisane w rozdziale 9 (cz. II). Zagadnienia teoretyczne i praktyczne związane z modelowaniem numerycznym wykonywanym na potrzeby podziemnego składowania i magazynowania przedstawiono w rozdziale 5 (cz. II).

Mając na uwadze rodzaj analizowanych danych (dane przestrzenne, właściwości fizyczno-mechaniczne itp.), stosuje się zarówno analizy danych jakościowe, jak i ilościowe, w tym (Olek i in., 2014; Majer i in., 2018):

- metody statystyczne: regresji, korelacji, wariancji i in.;
- podstawowe statystyki, opisowe (średnie, mediany, mody, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności itp.);
- wykresy: histogramy, skrzynkowe, krzywe i in.;
- klasyfikowanie danych na podstawie określonych kryteriów;
- grupowanie na podstawie określonych założeń;
- korelowanie (asocjowanie) zbiorów danych na podstawie wybranego parametru;
- integrowanie zbiorów danych na podstawie wybranego parametru.

Typowymi przykładami analizy danych są m.in. (Majer i in., 2018):

- wyznaczenie statystyk opisowych dla wartości wyprowadzonych parametrów geotechnicznych;

– wyznaczenie zależności np. między porowatością a przepuszczalnością;
– wyznaczenie zmienności cech fizycznych i mechanicznych w przestrzeni przeznaczonej na podziemny obiekt;
– wyznaczenie stref deformacji tektonicznych z wykorzystaniem metod geofizycznych (np. sejsmicznych).

Należy zaznaczyć, że metody statystyczne powinny być stosowane w przypadku posiadania odpowiedniej liczby wyników badań. Tylko wtedy możliwe jest określenie prawidłowości w zakresie stwierdzonych zjawisk, procesów i ich wspólnych zależności.

Odpowiednio przetworzone, zinterpretowane oraz przeanalizowane dane umożliwiają tworzenie modeli numerycznych, map, przekrojów, diagramów, tabel i innych formy prezentacji danych, na potrzeby bezpiecznego zaprojektowania obiektu podziemnego.

Podobnie jak w przypadku interpretacji danych, ich analiza powinna być wykonywana przez zespół doświadczonych osób, żeby ograniczyć możliwości popełnienia błędów.

Ocena wyników badań geologiczno-inżynierskich sprowadza się do przedstawienia opinii na temat zgromadzonych danych i jest podstawą do sformułowania wniosków w zakresie zmienności wyników badań oraz niepewności modelu geologicznego. Niezbędne jest przy tym określenie możliwości wpływu aparatury, technik pomiarowych oraz zmienności przestrzeni geologicznej na uzyskiwane wyniki badań i pomiary. Ostatecznie należy ocenić czy wykorzystane do badań metody zostały odpowiednio dobrane do występujących w górotworze warunków i czy są zgodne z warunkami stosowania wykorzystanych metod. Ocena wyników badań powinna brać pod uwagę:

– przydatność i wiarygodność danych archiwalnych;
– prawidłowe udokumentowanie wyników badań terenowych i laboratoryjnych;
– przegląd zebranych wyników badań terenowych i laboratoryjnych;
– metody wiercenia i pobierania próbek do badań oraz warunki ich transportu, przechowywania i przygotowania;
– opis makroskopowy stwierdzonych gruntów i skał;
– sposób wydzielenia warstw gruntów i skał wraz z ich poziomym i pionowym rozprzestrzenieniem oraz oceną ich jednorodności i zmienności;
– charakterystykę właściwości fizycznych, wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntów i skał w wydzielonych warstwach na podstawie uzyskanych wyników badań;
– wyznaczone niekorzystne procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne, np.: osuwiska, pustki, zapadliska, nieciągłości, deformacje;
– położenie wszystkich wyznaczonych poziomów wód podziemnych;
– wyprowadzone wartości parametrów geotechnicznych oraz cech fizyczno-mechanicznych dla wydzielonych warstw;
– graficzne przedstawienie wyników badań na mapach i przekrojach przedstawiających rozprzestrzenienie i układ warstw wraz z położeniem zwierciadeł wód podziemnych na tle założeń projektowych planowanej inwestycji.

W przypadku wyników badań laboratoryjnych, dokonując ich oceny, należy przede wszystkim zestawić bieżące wyniki z tymi z wcześniejszych badań archiwalnych (jeśli dostępne) w celu sprawdzenia czy są porównywalne. Ponadto podczas przeprowadzania oceny niezbędne jest sprawdzenie reprezentatywności próbek gruntów i skał w kontekście całego górotworu oraz uwzględnienie możliwości wpływu metod badawczych, technik wiertniczych i sposobu pobierania próbek na wyniki badań.

Przykładami oceny wyników badań są m.in.:

– ocena dostępnych danych archiwalnych ze względu na ich przydatność do scharakteryzowania górotworu i historii jego zagospodarowania, przede wszystkim z punktu widzenia zaprojektowania badań terenowych i laboratoryjnych;
– ocena dostępnych danych archiwalnych ze względu na możliwość występowania konfliktów środowiskowych;
– ocena reprezentatywności zbioru danych, pozyskanych wyników badań terenowych i laboratoryjnych dla wyznaczenia wartości wyprowadzonych parametrów geotechnicznych i zbudowania modelu geologicznego;
– ocena przydatności pozyskanych wyników badań terenowych i laboratoryjnych pod kątem zaprojektowania wszystkich obiektów infrastrukturalnych związanych z inwestycją, w tym określenia stateczności górotworu, podłoża budowlanego oraz sposobu posadowienia obiektów budowlanych naziemnych i sposobu wykonania obiektu podziemnego;
– ocena przydatności pozyskanych wyników badań terenowych i laboratoryjnych dla założeń projektowych dotyczących bezpośrednio planowanej inwestycji;
– ocena stopnia udokumentowania i rozpoznania przestrzeni podziemnej inwestycji, w celu podania zaleceń i rekomendacji do dalszych badań wraz z uzasadnieniem;
– ocena wyników badań, właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał oraz modelu geologicznego dla określenia możliwości wyboru lokalizacji, zaprojektowania, wykonania i eksploatacji planowanej inwestycji, jak i wszystkich obiektów budowlanych z nią związanych.

2.4. PRZEDSTAWIANIE WYNIKÓW BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH I ARCHIWIZOWANIE DANYCH

W przypadku dokumentowania geologiczno-inżynierskiego **przedstawianie** wyników badań jest właściwie tożsame z opracowaniem dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (części tekstowej i graficznej). Sposób przedstawienia danych zależy w znacznym stopniu od wymagań sformułowanych w rozporządzeniu odnoszącym się do dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016), definiujących zarówno zawartość merytoryczną części tekstowej, jak i rodzajów załączników jakie należy opracować (przekrojów,

map, zestawień, wykresów itp.). Zawartość dwóch typów dokumentacji (osobnego dla magazynowania i składowania substancji i odpadów oraz osobnego dla składowania CO_2) szczegółowo przedstawiono w rozdziałach 7.2 i 7.3 (cz. II).

Archiwizowanie danych powstających podczas procesu dokumentowania jest bardzo ważne z punktu widzenia ich zabezpieczenia w celu długotrwałego przechowywania, umożliwienia wglądu i ich ponownego użycia w przyszłości (gromadzenia). Zaleca się, żeby ich gromadzenie było prowadzone od początku realizacji inwestycji, dlatego należy dobrać odpowiedni i optymalny sposób archiwizowania zbieranych oraz wytwarzanych dokumentów, informacji, danych i wyników badań. Wszystkie efekty prac powstałe podczas dokumentowania geologiczno-inżynierskiego powinny być odpowiednio zarchiwizowane jako:

- dokumenty papierowe i ich cyfrowe kopie;
- dokumenty elektroniczne w formacie umożliwiającym edycję;
- cyfrowe bazy danych.

Cyfrowe wersje powinny być odpowiednio skatalogowane i przechowywane w specjalnie przeznaczonym na to miejscu (np. serwer) i/lub jako kopia na informatycznych nośnikach danych. Sposób archiwizacji dokumentów i danych zazwyczaj jest określany indywidualnie i każda instytucja uczestnicząca w procesie inwestycyjnym samodzielnie go definiuje. Dlatego zazwyczaj dokumenty i dane są przekazywane do archiwizacji w formie plików nieedytowalnych np. PDF. Niestety takie dokumenty i dane mają ograniczoną przydatność w perspektywie ich późniejszej edycji, przetwarzania, interpretowania, udostępniania oraz cyfrowego wykorzystania (np. do analiz lub prowadzenia baz danych). Chcąc z nich skorzystać na dalszych etapach procesu inwestycyjnego lub podczas realizacji innych inwestycji, w pierwszej kolejności konieczne jest ich scyfrowanie do formatu umożliwiającego edycję, przetwarzanie, interpretowanie, analizę i ocenę. Mając to na uwadze, zaleca się, żeby dane i dokumenty przekazywać do archiwizacji w formacie zapewniającym możliwość ich edycji.

3. ZAKRES I METODYKA BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Badania geologiczne, w tym badania geologiczno-inżynierskie[41], na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania lub składowania są powiązane z etapami procesu inwestycyjnego oraz z dotychczasowym rozpoznaniem struktury i lokalizacji. Jak już wspomniano we wcześniejszym rozdziale, na etapie przeglądu i wyboru lokalizacji dominują analizy materiałów archiwalnych, w tym: map, dokumentacji, rdzeni wiertniczych oraz wyników badań geofizycznych, geomechanicznych, geochemicznych itp., a rzadko są wykonywane badania bieżące. Natomiast na etapie charakterystyki lokalizacji konieczne jest dostarczenie szczegółowych danych do opracowania modelu geologicznego (parametryczno-strukturalnego) oraz modelu uwzględniającego prognozę zmian w czasie (model dynamiczny). Z tego powodu na tym etapie należy wykonywać badania własne, nawet w przypadku dużego zasobu badań archiwalnych.

Konieczność wykonania badań geologiczno-inżynierskich wynika z faktu, że badania archiwalne – podobnie jak archiwalne rdzenie wiertnicze zgromadzone w NAG – są często bardzo stare, zdezaktualizowane, a nierzadko wykonywane były w innym celu (np. dla wydobycia kopaliny), zatem ich opis zawiera inny zakres lub stopień szczegółowości i dlatego wymagają weryfikacji lub uzupełnienia z uwzględnieniem bieżącego celu dokumentowania. Jest to szczególnie istotne w przypadku dokumentowania struktur geologicznych, w których przez lata była prowadzona eksploatacja górnicza i zmieniły się warunki geomechaniczne. W przypadku, gdy zbiór danych archiwalnych jest duży, badania te powinny mieć charakter komplementarny, pozwalający na uzupełnianie zbioru o nowe dane, np. wcześniej niebadane parametry lub badania o większej rozdzielczości niż te archiwalne, dzięki dostępności nowoczesnych technik (np. geofizyka 3D). Realizacja badań terenowych jest również możliwa na wczesnych etapach (przeglądu i wyboru lokalizacji), ale dotyczy to przypadków, gdy dla wybranych rejonów nie ma żadnych danych, co zdarza się niezmiernie rzadko. Zakres badań geologiczno-inżynierskich zaproponowanych do wykonania na poszczególnych etapach rozpoznania geologicznego struktury i lokalizacji przedstawiono na rysunku 58.

Zaproponowany zakres badań geologiczno-inżynierskich na poszczególnych etapach rozpoznania geologicznego lokalizacji obiektu podziemnego dobiera się w zależności od potrzeb, które ustala zespół dokumentatorów odpowiedzialnych za zaprojektowanie, interpretację, analizę i ocenę wyników badań geologiczno-inżynierskich.

W praktyce zdarza się, że lokalizacja jest z góry określona i wszystkie czynności są przeprowadzane tylko dla etapu charakterystyki lokalizacji. Zakres badań i analiz zależy w dużym stopniu od ilości i jakości materiałów archiwalnych, rodzaju obiektu i sposobu wprowadzania substancji/odpadu do górotworu, natomiast metodyka powinna być dostosowana do rodzaju struktury, w jakiej zlokalizowany będzie obiekt podziemny. W dalszej części rozdziału opisano główne wymagania odnośnie do poszczególnych grup metod badań z wyjątkiem analizy materiałów archiwalnych, która została opisana w rozdziale 2.1 (cz. II). Poniżej zaproponowano katalog metod badań geologiczno-inżynierskich możliwych do wykorzystania na różnych etapach rozpoznania geologicznego lokalizacji obiektu podziemnego (tab. 35).

Biorąc pod uwagę cel badań, większość badań terenowych będzie stanowiła roboty geologiczne w rozumieniu ustawy pgg, zatem będzie wymagała opracowania PRG. Planując badania terenowe, należy pamiętać, że niezbędne może być uzyskanie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie złoża kopaliny w przypadku, gdy planowany obiekt podziemny zlokalizowany będzie w złożu (np. soli) lub na poszukiwanie lub rozpoznawanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla w przypadku, gdy obiekt będzie składowiskiem CO_2 (w obecnym stanie prawnym wyłącznie na potrzeby projektu demonstracyjnego). Wówczas do wniosku koncesyjnego załącza się PRG na planowane badania poszukiwawcze lub rozpoznawcze (patrz: cz. I, rozdz. 8.1).

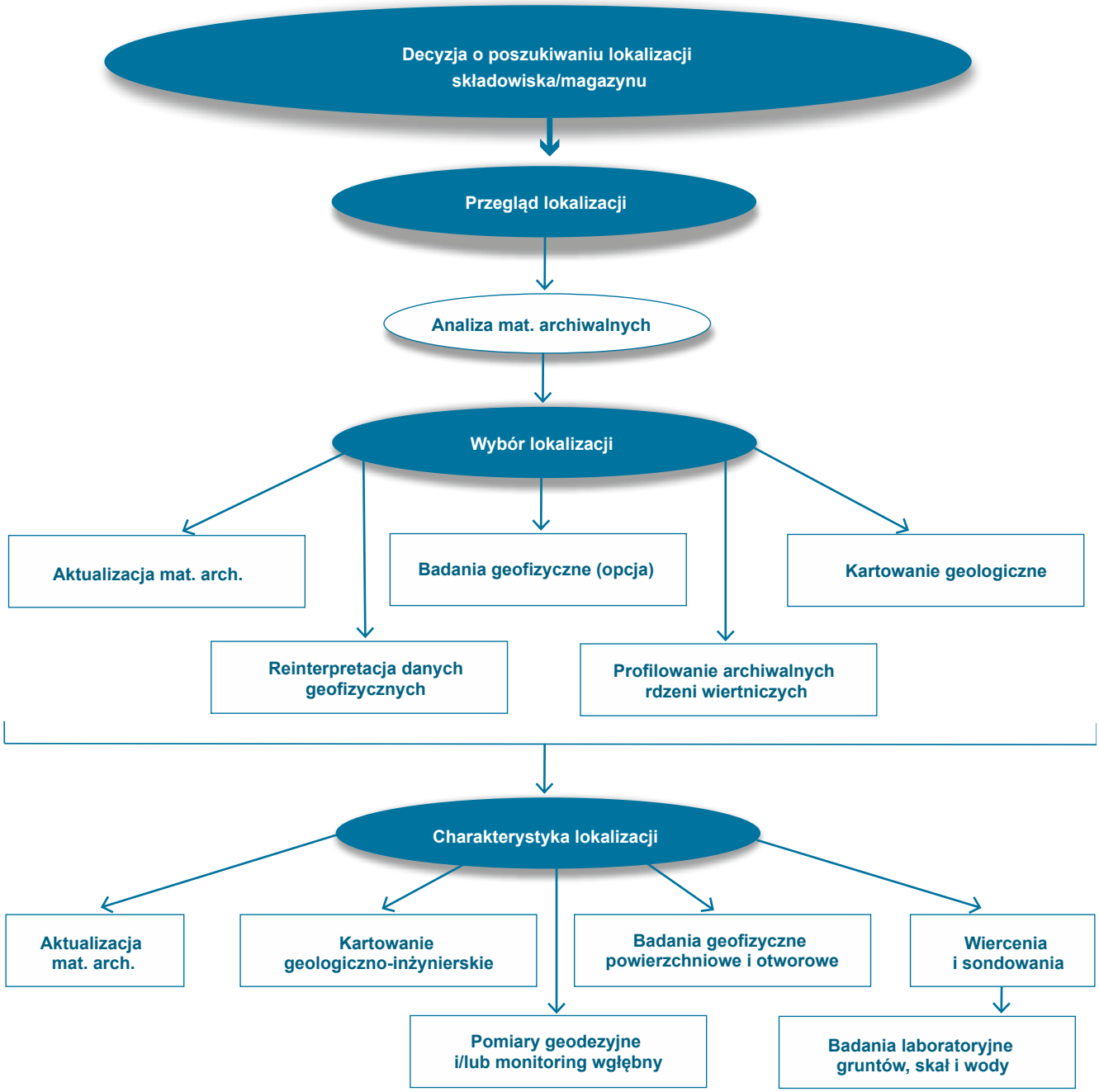
Projektując badania geologiczno-inżynierskie, poza określeniem ich rodzaju, należy wskazywać metodykę ich wykonania. Do badań zaleca się stosować aktualne Polskie Normy, normy zagraniczne, zwalidowane procedury badawcze stosowane przez laboratoria lub powszechnie stosowane metody badawcze opisane w literaturze (np. instrukcje ISRM). Normy wycofane zaleca się stosować w uzasadnionych przypadkach. Polska Norma PN-EN 1997-2:2009 określa zalecenia w zakresie pobierania próbek skał, pomiarów wód podziemnych w skałach, badania laboratoryjne skał obejmujące przygotowanie próbek do badań, badania klasyfikacyjne, fizyczne, pęcznienia i wytrzymałościowe. W normie badania polowe ograniczono jedynie do gruntów. Obecnie przygotowywana nowa wersja Eurokodu 7 (prEN 1997-2:2022) przewiduje szeroki zakres badań skał, w tym podaje metody badań polowych skał oraz właściwości i parametry otrzymywane w ich efekcie. Należy podkreślić, że zgodnie z przepisami ustawy o normalizacji stosowanie norm jest dobrowolne,

[41] Termin *badania geologiczno-inżynierskie* podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

a ich używanie należy traktować jako dobrą praktykę. Takie podejście umożliwia otrzymywanie powtarzalnych i porównywalnych wyników badań. W celu uzyskania aktualnej informacji w zakresie statusu i stosowania norm zaleca się korzystać ze strony internetowej Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (https://wiedza.pkn.pl/wyszukiwarka-norm).

3.1. PRACE KARTOGRAFICZNE

Prace kartograficzne w zależności od etapu ich wykonywania można podzielić na wizję terenową, kartowanie geologiczne oraz kartowanie geologiczno-inżynierskie, różniące się poziomem szczegółowości. Wizja terenowa to krótka



Rys. 58. Zakres badań geologiczno-inżynierskich na poszczególnych etapach rozpoznania geologicznego lokalizacji obiektu podziemnego

Tabela 35

Katalog metod badań możliwych do wykorzystania na różnych etapach rozpoznania geologicznego lokalizacji

Rodzaj badań			Etap badań lokalizacji			Czynniki geologiczne			Czynniki techniczne
			przegląd lokalizacji	wybór lokalizacji	charakterystyka lokalizacji*	budowa geologiczna	warunki hydrogeologiczne	warunki geologiczno-inżynierskie	uwarunkowania techniczne i technologiczne
1			**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Przegląd materiałów archiwalnych	przegląd archiwalnych opracowań geologicznych		x			x	x	x	
	przegląd archiwalnych map		x			x	x	x	
	przegląd archiwalnych profili wierceń		x			x	x	x	
	przegląd archiwalnych badań geofizycznych		x			x	x	x	
	przegląd baz danych geologicznych		x			x	x	x	
	przegląd archiwalnych opracowań innych niż geologiczne		x						x
	przegląd baz danych innych niż geologiczne		x						x
	przegląd danych z monitoringu (jeżeli jest prowadzony)			x				x	x
	przegląd danych z kopalń (dla istniejących zakładów górniczych)			x				x	x
Aktualizacja przeglądu materiałów archiwalnych	przegląd nowych lub aktualniejszych danych			x	x	x	x	x	x
Reinterpretacja materiałów archiwalnych	reinterpretacja (w tym ewentualnie reprocessing) danych sejsmicznych				x	x	x	x	
	reinterpretacja i kalibracja danych geofizyki otworowej					x	x	x	
	profilowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych			x		x	x	x	
	opróbowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych i badania na próbkach archiwalnych			x		x		x	
	reinterpretacja danych z monitoringu (jeśli jest prowadzony)			x	x			x	x
Prace kartograficzne	wizja terenowa		x	x	x				x
	kartowanie geologiczne			x		x	x		
	kartowanie geologiczno-inżynierskie				x			x	
Badania geofizyczne powierzchniowe	badania geofizyczne płytkie (inżynierskie)**	elektrooporowe			x		x	x	
		georadarowe			x			x	
		sejsmiczne			x			x	
		mikrograwimetryczne			x			x	
	badania geofizyczne głębokie	sejsmiczne 2D		x	x	x			
		sejsmiczne 3D			x	x			
		grawimetryczne		x		x		x	x
		magnetotelluryczne		x		x			

Tabela 35 cd.

1			2	3	4	5	6	7	8
Wiercenia, badania otworowe i opróbowanie	opis i opróbowanie rdzenia wiertniczego	opis przewiercanych gruntów i skał			x	x	x	x	
		ocena masywu skalnego m.in. wg wskaźnika RQD			x			x	
	badania geofizyczne otworowe	elektrooporowe			x	x			
		radarowe			x	x			
		sejsmiczne			x	x		x	
		akustyczne			x	x		x	
		radiometryczne			x	x			
		termometryczne			x			x	
		profilowanie średnicy otworu kawernomierzem otworowym			x	x			x
		badanie stanu zacementowania rur okładzinowych cementomierzem			x				x
		badanie grubości rur okładzinowych imagerem akustycznym			x				x
		pomiary odchylenia otworu od pionu inklinometrem			x				x
	badania otworowe inne	testy szczelinowania			x			x	x
		profilowanie gazowe			x			x	x
		badania hydrogeologiczne, hydrodynamiczne, hydrogeochemiczne			x		x	x	
Sondowania geologiczno-inżynierskie**					x			x	
Badania laboratoryjne gruntów	klasyfikacyjne				x	x		x	
	fizyczne				x	x		x	
	mechaniczne				x			x	
Badania laboratoryjne skał	klasyfikacyjne			x	x	x		x	
	petrofizyczne			x	x	x		x	
	geomechaniczne			x	x	x		x	
Badania geochemiczne gruntów, skał i wody					x		x	x	x
Pomiary geodezyjne				x	x	x	x	x	x
Badania w wyrobiskach górniczych ***					x			x	x

* w przypadku gdy lokalizacja jest ustalona i etap charakterystyki lokalizacji jest jedynym etapem w procesie inwestycyjnym, wówczas wszystkie czynności są wykonywane na tym etapie (Ostrowski i in., 2022)

** na potrzeby rozpoznania pod część naziemną

*** w przypadku istniejących zakładów górniczych

wizyta w lokalizacji, służąca ogólnej ocenie terenu pod kątem możliwości zlokalizowania na nim badań terenowych. Kartowanie geologiczne służy w szczególności ogólnej ocenie terenu pod kątem możliwości umiejscowienia obiektów części naziemnej inwestycji. Kartowanie geologiczno-inżynierskie to szczegółowe rozpoznanie powierzchni terenu przeznaczonego pod inwestycje i obejmuje (Majer i in., 2018):

- weryfikację zgodności materiałów kartograficznych z rzeczywistością;
- wstępną charakterystykę geologiczną strefy przypowierzchniowej, umożliwiającą zaprojektowanie badań oraz dobór odpowiednich metod badawczych;
- identyfikację i opis występujących zjawisk i procesów geodynamicznych (kras, osuwiska, osiadanie zapadowe w lessach, sufozja, erozja, abrazja, upłynnienie gruntu itp.);
- identyfikację przejawów wód gruntowych, ujęć wód podziemnych;
- identyfikację i opis naturalnych i antropogenicznych odsłonięć;
- obserwacje stanu obiektów budowlanych i górniczych (odkształcenia obiektów i podłoża gruntowego, m.in.: pęknięcia, rysy, obniżenia terenu);
- wyznaczanie intersekcyjnych granic geologicznych na podstawie pomiarów biegu, upadu i kierunku spękań (jeżeli występują odsłonięcia skalne);
- weryfikację możliwości wykonania planowanych robót geologicznych pod względem dostępności terenu, lokalizację utrudnień naturalnych (strome zbocza, podmokłości, zalesienie) oraz antropogenicznych (gęsta zabudowa i infrastruktura, konieczność uzyskania pozwoleń na wejście od właścicieli gruntów);
- uszczegółowienie danych wizji terenowej (np. wywiad środowiskowy).

Wynikiem kartowania geologiczno-inżynierskiego powinno być graficzne opracowanie zaobserwowanych zjawisk, które mogą mieć znaczenie z punktu widzenia warunków i potrzeb realizacji inwestycji, najlepiej w postaci warstwy przestrzennej.

3.2. BADANIA GEOFIZYCZNE POWIERZCHNIOWE

3.2.1. Geofizyka płytka (inżynierska)

Badania geofizyki płytkiej (inżynierskiej) mogą być wykorzystane do charakterystyki podłoża pod kątem realizacji części naziemnej obiektu podziemnego. Można wykorzystywać do tego celu metody elektrooporowe (do oceny litologii warstw podłoża), sejsmiczne (do oceny sztywności podłoża i wybranych parametrów mechanicznych), mikrograwimetryczne (do lokalizacji ewentualnych pustek) czy georadarowe (do identyfikacji infrastruktury podziemnej) lub inne w zależności od potrzeb. Metody te są szczegółowo opisane w innych, zbiorczych publikacjach dotyczących metod badań geologiczno-inżynierskich (np. Majer i in., 2018; Tarnawski, 2020; Ostrowski i in., 2022).

3.2.2. Geofizyka głęboka

Badania geofizyki głębokiej przydatne do oceny górotworu na potrzeby lokalizacji obiektu podziemnego to przede wszystkim badania sejsmiczne, które najlepiej pośród wszystkich metod geofizycznych obrazują strukturę geologiczną. Metody te z dużym prawdopodobieństwem określają granice pomiędzy warstwami o odmiennej charakterystyce propagowania się fali wzbudzanej na powierzchni. Z tego powodu na profilach sejsmicznych potencjalna warstwa zbiornikowa dobrze odznacza się od ewentualnych warstw izolacyjnych. Za pomocą badań sejsmicznych można więc dobrze określić miąższość, rozciągłość i zmienność litologiczną tych formacji.

Podstawowym zestawem danych geologicznych służących do określenia przestrzennej struktury obiektu podziemnego są **profilowania sejsmiczne 2D** lub **zdjęcia sejsmiczne 3D**. Dane te są zwykle interpretowane z wykorzystaniem otworów wiertniczych pozwalających na kalibrację głębokości zarejestrowanych horyzontów sejsmicznych. Pozostałe metody geofizyczne mają mniejsze znaczenie, ale mogą pełnić rolę uzupełniającą. Badania grawimetryczne można wykorzystać do interpretacji przebiegu uskoków pomiędzy profilami sejsmicznymi 2D (na podstawie lineamentów grawimetrycznych). Metodę magnetotelluryczną można wykorzystać do identyfikacji warstw zawierających wody złożowe lub wykorzystać pomocniczo w rozpoznawaniu wysadów solnych o skomplikowanej budowie, a także tam, gdzie wykonanie badań sejsmiki głębokiej nie jest możliwe. Najdokładniejsze są zdjęcia sejsmiczne 3D, jednak pokrycie obszaru Polski tymi danymi nie jest duże, w porównaniu do badań 2D. Badania 3D na dużą skalę były wykonywane na linii Gorzów–Poznań–Kalisz oraz w rejonie zapadliska przedkarpackiego w pasie Bochnia–Przemyśl, a także na wybrzeżu Bałtyku w rejonie Kamienia Pomorskiego i Kołobrzegu, wzdłuż struktury Koszalin–Chojnice oraz w rejonie Lublina i Zamościa (wg https://geologia.pgi.gov.pl/). W odniesieniu do istniejących magazynów lub składowisk, zdjęciem sejsmicznym 3D objęte są: Daszewo, Bonikowo, Wierzchowice, Husów, Husów–Albigowa–Krasne, Brześnica, Swarzów oraz częściowo obszar na Bałtyku przeznaczony pod składowanie CO_2. Na pozostałym obszarze Polski są to nieliczne, pojedyncze zdjęcia 3D. Głębokie badania sejsmiczne 2D są bardziej rozpowszechnione i dokumentują większość struktur na Niżu Polskim. Wykonywane były głównie na zlecenie przemysłu naftowego. Najmniej profilowań sejsmicznych wykonywano w Sudetach, na platformie prekambryjskiej i w rejonie kieleckim. Pozostały obszar kraju ma bardzo duże pokrycie profilami sejsmicznymi. Badaniami grawimetrycznymi (zdjęcie półszczegółowe) obecnie pokryta jest cała Polska. W niektórych rejonach dostępne jest także zdjęcie szczegółowe, dające lepsze możliwości interpretacyjne. Wiele z tych badań było przeprowadzonych na zlecenie Państwowego Instytutu Geologicznego w latach 60., 70. i 80. Badania magnetotelluryczne z kolei były głównie wykonywane w Karpatach na zlecenie przedsiębiorstw naftowych, a także w rejonie Gdańska, Gorzowa Wielkopolskiego, Płocka, Tomaszowa Lubelskiego czy Raciborza.

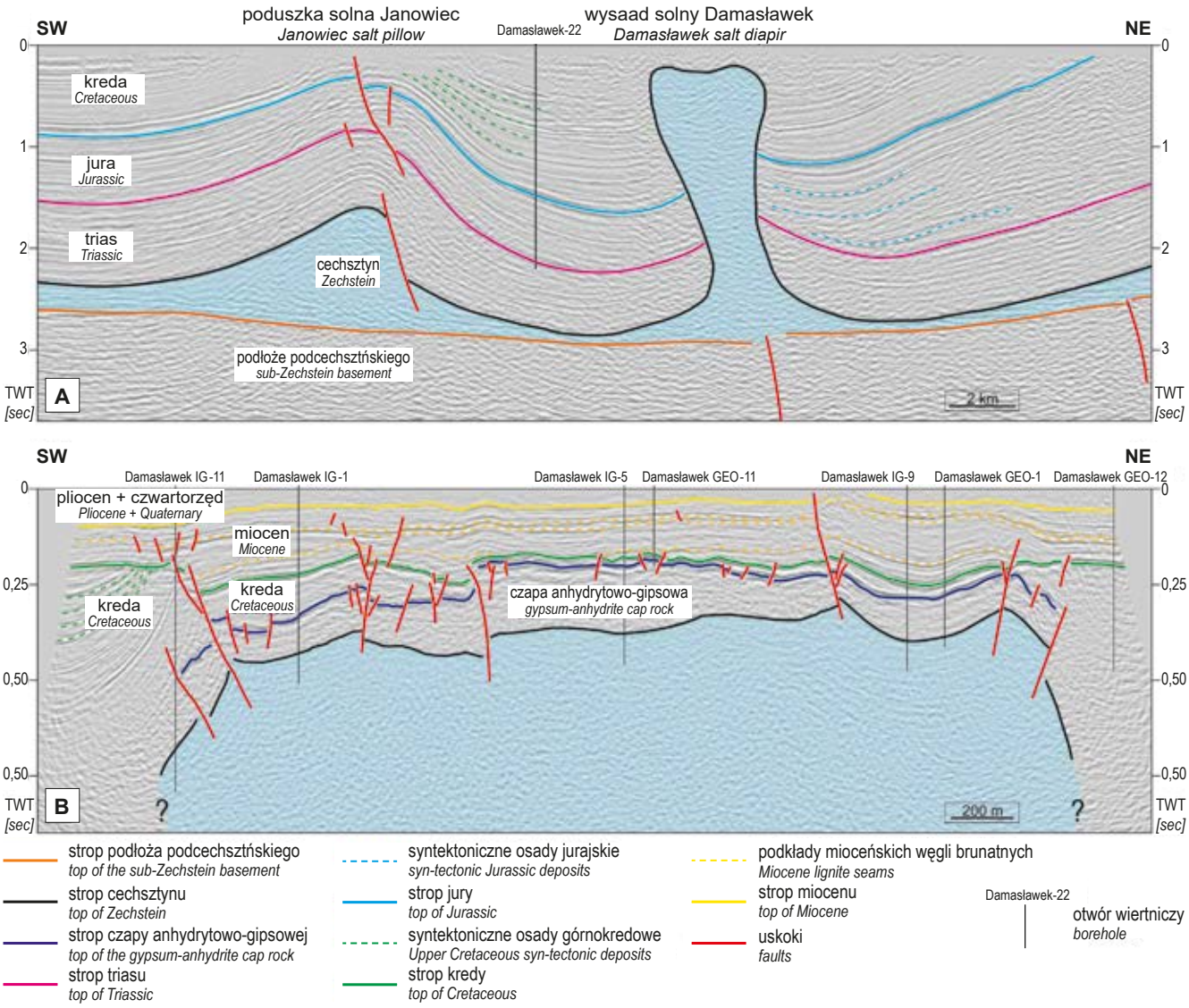
Wszystkie wyżej opisane dane są **własnością Skarbu Państwa** i ich udostępnianie regulują przepisy prawa geologicznego i górniczego.

Z uwagi na dużą przydatność badań sejsmicznych w początkowych fazach procesu inwestycyjnego, zaleca się ich planowanie i wykonywanie już na etapie wyboru lokalizacji. Dobrze wykonane badania sejsmiczne razem z ich dowiązaniem do otworów wiertniczych (kalibracja) dają możliwość nie tylko wyznaczenia przebiegu poszczególnych horyzontów, czy identyfikacji stref uskokowych, lecz także pozwalają ocenić zgeneralizowane właściwości mechaniczne (dynamiczne) analizowanych formacji, takie jak: współczynnik Poissona, moduł Younga czy moduł ścinania oraz anizotropię ośrodka. Można także za ich pomocą oszacować stan spękania górotworu.

Po wstępnym przetworzeniu danych sejsmicznych (ang. *processing*), dokonuje się ich interpretacji strukturalnej oraz sejsmostratygraficznej. Interpretacja strukturalna polega na analizie uzyskanych obrazów pod kątem występowania i kształtu struktur geologicznych, np. synklin, antyklin, wysadów solnych (rys. 59, 60) czy stref uskokowych na podstawie przebiegu granic sejsmicznych. Analiza sejsmostratygraficzna pozwala na ustalenie zależności pomiędzy danymi pomiarowymi a litologią badanego ośrodka. W zależności od celu badań na kolejnym etapie dokonuje się interpretacji celowej, np. lokalizacji złóż węglowodorów, konturowanie ciała solnego, parametrów warstwy zbiornikowej itp.

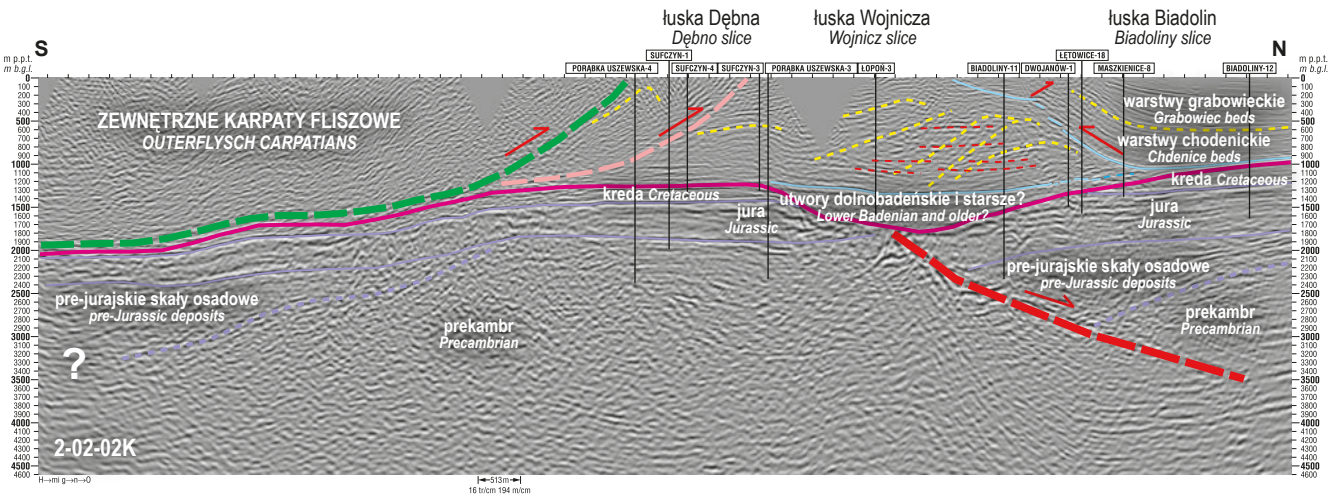
Oprócz standardowych metod interpretacji danych sejsmicznych stosowanych w badaniach poszukiwawczych (głównie niekonwencjonalnych złóż węglowodorów), stosuje się także zaawansowane metody interpretacji, takie jak np. (Hall i in., 2002; Marzec i in.; 2006; Leginowicz, 2014):

– integracja atrybutów sejsmicznych, danych otworowych oraz analizy AVO (zmian zapisu sejsmicznego z offsetem), które pozwalają pośrednio wyznaczyć parametry fizyczne (np. gęstość czy porowatość) oraz



Rys. 59. Przykład interpretacji geometrii i tektoniki wysadu solnego Damasławek (Krzywiec, 2009)

A – głęboki regionalny profil sejsmiczny, B – płytki wysokorozdzielczy profil sejsmiczny



Rys. 60. Przykład interpretacji strukturalnej na potrzeby modelowania pułapek dla węglowodorów (Krzywiec i in., 2004)

mechaniczne (współczynnik Poissona, moduł Younga czy moduł ścinania), a także prześledzić struktury tektoniczne o niewielkich zrzutach lub duże spękania;
– analiza sejsmicznej anizotropii azymutalnej propagowania się fali sejsmicznej (ang. *seismic azimuthal anisotropy*), do oceny anizotropii ośrodka, co przekłada się na możliwość wyznaczenia kierunku dominujących spękań lub/i naprężeń poziomych, a także parametrów kompakcji;
– analiza zmiany amplitudy sygnału sejsmicznego z kątem i azymutem (AVAZ – ang. *amplitude versus angle and azimuth*), pozwalająca oszacować występujące w górotworze naprężenia i ich orientację.

Analizy te wymagają dobrej jakości danych (często o dużej krotności pokrycia) oraz dużego doświadczenia zespołu interpretacyjnego, posiadającego wypracowane procedury analityczne. Dzięki badaniom prowadzonym na potrzeby poszukiwania gazu łupkowego, możliwe było zdobycie doświadczenia w zakresie metodologii niestandardowej interpretacji. Szczególnie trudne do interpretacji są utwory kompleksu podcechsztyńskiego z uwagi na wielokrotne odbicia i pochłanianie energii przez kompleksy ewaporatów (soli, anhydrytu i dolomitu).

Należy zaznaczyć, że zgodnie z art. 79 ust. 1a ustawy pgg prace geologiczne z zastosowaniem metod geofizycznych w granicach obszarów morskich RP mogą być wykonywane tylko na podstawie PRG. Zatem badania sejsmiczne wykonywane na potrzeby poszukiwania lub rozpoznawania struktur geologicznych dla lokalizacji magazynów i składowisk podziemnych wymagają opracowania PRG i zatwierdzenia go w drodze decyzji lub załączenia do wniosku koncesyjnego.

3.3. WIERCENIA, BADANIA OTWOROWE I OPRÓBOWANIE

W celu prawidłowego zaprojektowania badań otworowych oraz opróbowania otworu niezbędna jest względnie wiarygodna ocena przewidywanego profilu otworu wiertniczego. Do tego celu można wykorzystać opisane wyżej badania geofizyczne (rozdz. 3.2.2), skalibrowane dzięki otworom archiwalnym. Dane otworowe są niezbędne również do opracowania modeli petrofizycznych ośrodka skalnego, a także do kalibracji modelu geofizycznego. Lokalizacja powinna wynikać zarówno ze szczegółowej analizy dostępnych danych, jak i z uwarunkowań lokalnych (społecznych, technicznych i środowiskowych) określonych w ramach wizji terenowej.

Na potrzeby rozpoznania górotworu w celu podziemnego magazynowania/składowania wykorzystywane lub wykonywane są głównie **głębokie otwory wiertnicze** (do kilku tysięcy metrów). Podczas procesu wiercenia monitorowanych jest wiele parametrów, które są brane pod uwagę przy wstępnej charakterystyce górotworu. Są to: pomiary postępu wiercenia, nacisku, momentu obrotowego, wypływu płuczki, ciśnienia płuczki (wchodzącej i wychodzącej), temperatury płuczki, objętości płuczki w zbiornikach oraz zgazowania płuczki. Dane pomiarowe są na bieżąco obserwowane przez osobę wykonująca wiercenie (wiertacza), a obecnie mogą być także na bieżąco przesyłane przez sieć do wybranych adresatów (geologa dozoru, kierownika otworu, Inwestora itp.). Dane te mogą być również przedstawiane graficznie w postaci profili stanowiących zestawienie wybranych parametrów (np. parametrów płuczki).

Na potrzeby rozpoznania podłoża pod obiekty naziemne stosuje się też **płytkie otwory wiertnicze**, jednak nie będą one opisywane w tym rozdziale z uwagi na fakt, że są to badania powszechnie wykonywane, a wymagania dla nich podano zarówno w normach (np. PN-EN ISO 22475-1), jak i publikacjach branżowych o charakterze wytycznych lub poradników (np. Majer i in., 2018; Tarnawski, 2020).

Prace wiertnicze oraz pobór próbek do badań laboratoryjnych zaleca się prowadzić zgodnie z wymaganiami obowiązujących przepisów oraz aktualnych norm PN-EN 1997-2 i PN-EN ISO 22475-1. Pomiary w otworach wiertniczych można wykonywać na podstawie normy PN-EN ISO 22476-15:2016-10.

Zgodnie z zapisami aktualnej normy PN-EN ISO 22475-1:2022-04 próbki gruntów i skał można pozyskiwać jedną z trzech metod (dobranych odpowiednio do warunków geologicznych i wymaganej w badaniach laboratoryjnych kate-

gorii pobierania próbek oraz ich klasy jakości): przez wiercenie (ciągłe opróbowanie metodą rdzeniową lub z niszczeniem struktury gruntu), z zastosowaniem próbników (opróbowanie na wybranych głębokościach) oraz przez wycinanie bloków. W przypadku wierceń na potrzeby magazynowania lub składowania najbardziej popularną metodą jest wiercenie metodą pełnego rdzeniowania z uwagi na dużą głębokość otworu, a tym samym cenny materiał badawczy zarówno do bieżących badań, jak i archiwizacji w postaci próbek trwałego przechowywania. Pozostałe techniki można wykorzystać do opróbowania na potrzeby rozpoznania podłoża dla części naziemnej.

Z prób gruntów i skał pobiera się próbki do badań laboratoryjnych. Zakres opróbowania powinien być dostosowany do zakresu badań laboratoryjnych próbek gruntów i skał (rozdz. 3.5 i 3.6).

W aktualnej normie PN-EN ISO 22475-1:2022-04 wydzielono pięć kategorii pobierania próbek skał (w poprzedniej wersji normy były trzy kategorie):

– **kategoria A**: struktura, tekstura, wytrzymałość i naprężenia *in situ* są nienaruszone. Można wykonywać badania wytrzymałościowe i odkształceniowe. Można ocenić nieciągłości oraz RQD;
– **kategoria B**: struktura i tekstura są nienaruszone. Można wykonywać badania przepuszczalności, porowatości i gęstości oraz analizy uwarstwienia. Można wykonywać na nich badania punktowego obciążenia. Można ocenić nieciągłości oraz RQD;
– **kategoria C**: ogólna struktura i tekstura skały są nienaruszone. Można wykonać badanie wilgotności. Możliwa może być ocena nieciągłości. Dostrzegalne mogą być także granice warstw oraz oznaki wietrzenia;
– **kategoria D**: ogólna struktura jest nienaruszona i niezmieniony jest skład mineralny. Można wykonać badania dla niewielkich odcinków oraz określić granice Atterberga. Dostrzegalne są granice oraz następstwo warstw;
– **kategoria E**: zmienione właściwości skał w wyniku procesu wiercenia. Może być tylko zgrubne wskazanie rodzaju warstw i ich miąższości (z dokładnością do 0,5 m). Są to np. zwierciny w płuczce.

Norma (PN-EN ISO 22475-1:2022-04) wyróżnia także pięć klas jakości próbek skał (w poprzedniej wersji normy nie wydzielono ich). W związku z aktualizacją normy PN-EN ISO 22475-1:2022-04 zmieniły się również zasady dotyczące doboru kategorii i klasy jakości próbek gruntów do badań laboratoryjnych (tab. 36, 37).

Z uwagi na duże koszty wykonania głębokich otworów wiertniczych, często projektuje się je zarówno jako rozpoznawcze (badawcze), jak i eksploatacyjne (np. do późniejszego zatłaczania i odbioru substancji lub jako otwór monitoringowy lub awaryjny). Wykonanie głębokich otworów jest robotą geologiczną w rozumieniu ustawy pgg, należy więc opracować PRG i zatwierdzić go w drodze decyzji lub załączyć do wniosku koncesyjnego. Należy także pamiętać, że

Tabela 36

Możliwe klasy jakości próbek skał na podstawie stanu rdzenia wiertniczego (PN-EN ISO 22475-1:2022-04)

Wskaźnik jakości rdzenia* (*Core Quality Index* – CQI)	Opis stanu rdzenia	Wygląd rdzenia/kryteria wskaźnika jakości rdzenia	Możliwa klasa jakości**
1	bardzo słaby	rdzeń wykazuje poważne naruszenie spoiwa i/lub jego wymycie, pozostawiając głównie grubsze ziarna; ogólny wygląd rdzenia jest zaburzony i zmieniony; alternatywnie rdzeń może być mocno wysuszony, z wyraźnymi oznakami skurczu i spękań	3/4
2	słaby	rdzeń wykazuje oznaki znacznego naruszenia spowodowanego przez proces wiercenia; oczyszczanie rdzenia powoduje usunięcie/zaburzenie ziarn; obserwowany jest nadmiar wody na powierzchni rdzenia lub płytko w obrębie spoiwa; wymaga usunięcia zmiękczonego materiału znajdującego się na powierzchni rdzenia; alternatywnie rdzeń może być mocno wysuszony, z wyraźnymi oznakami skurczu i spękań	3
3	średni	rdzeń po oczyszczeniu powierzchni wykazuje wyraźne oznaki naruszenia w wyniku wiercenia; wyraźnie widoczna woda/zmiękczenie na powierzchni rdzenia; alternatywnie rdzeń może wykazywać ślady wysuszenia w obrębie odcinków rdzenia i/lub na końcach rdzenia	2/3
4	dobry	rdzeń nie wykazuje wyraźnych oznak naruszenia w wyniku wiercenia; wyraźnie widać niewielką ilość wody /zmiękczenie na powierzchni rdzenia; brak wyraźnych oznak wysychania rdzenia, tylko sporadyczne ślady przesuszeń na końcach rdzenia	1/2
5	znakomity	rdzeń nie wykazuje śladów naruszenia w wyniku wiercenia ani śladów wody/ zmiękczenia na powierzchni rdzenia; brak śladów wysychania	1

UWAGA: Tabela jest przede wszystkim przeznaczona do oceny stanu rdzeni uzyskanych z zastosowaniem techniki wiercenia obrotowego. Może być stosowana w określonych warunkach do oceny rdzenia otrzymanego ze skał słabych, takich jak mułowce czy ze słabych mułowców i piaskowców.

* termin *wskaźnik jakości rdzenia* podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia"

** ustalona możliwa klasa jakości próbki powinna być zweryfikowana z rzeczywistą klasą próbki. Klasy jakości mogą się zmniejszać w następstwie pobrania próbki, więc np. próbka klasy 2 nigdy nie może wzrosnąć do klasy 1. Nominalna próbka klasy 1 może jednak spaść do próbki klasy 2 (lub gorszej), w zależności od różnych czynników, w tym średnicy rdzenia, narzędzia wiertniczego i rodzaju płuczki, warunków gruntowych, przechowywania i transportu próbek

Tabela 37

Dobór kategorii pobierania próbek skał i ich klasy jakości w zależności od rodzaju badania laboratoryjnego (PN-EN ISO 22475-1:2022-04)

Właściwości skał	Klasy jakości próbek skał do badań laboratoryjnych				
	1	2	3	4	5
Niezmienione właściwości					
Oznaczenie rodzaju skały	x	x	x	x	x
Skład mineralogiczny i kształt ziarn	x	x	x	x	x
Uziarnienie	x	x	x	x	
Tekstura	x	x			
Rozmiar ziarna	x	x	x	x	
Gęstość, porowatość, przepuszczalność	x	x			
Wytrzymałość i odkształcalność	x				
Właściwości możliwe do oznaczenia					
Granice warstw – orientacyjne określenie	x	x	x	x	x
Granice warstw – szczegółowe określenie	x	x	x	x	
Wietrzenie	x	x	x		
Opis nieciągłości	x	x	x		
Właściwości nieciągłości	x	x			
Ogólny stan spękania (w tym RQD)	x	x			
Granice Atterberga, gęstość właściwa, zawartość części organicznych	x	x	x	x	
Wilgotność	x	x	x		
Gęstość, porowatość, przepuszczalność	x	x			
Wytrzymałość, odkształcalność i sztywność	x				
Kategorie opróbowania*	A				
		B			
			C		
				D	
					E

* poszczególne kategorie opróbowania opisano w tekście – str. 145

zgodnie z zapisami ustawy pgg oraz rozporządzenia w sprawie gromadzenia i udostępniania informacji geologicznej (Rozporządzenie..., 2017) rdzenie (lub ich fragmenty, a także próbki okruchowe), pobrane w ramach robót geologicznych w celu poszukiwania lub rozpoznawania kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, służących rozpoznaniu budowy głębokiego podłoża oraz wykonywane w celu określania warunków hydrogeologicznych oraz geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów lub podziemnego składowania dwutlenku węgla mogą stanowić **próbki trwałego przechowywania** w zakresie określonym w koncesji lub (rzadziej) w decyzji zatwierdzającej PRG. Sposób przekazywania próbek jest ściśle określony w rozporządzeniu w sprawie przekazywania informacji z bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych (Rozporządzenie..., 2015). W świetle tego rozporządzenia, przekazaniu podlegają w szczególności:

- próby okruchowe w ilości nie mniejszej niż ½ objętości próby;
- rdzenie wiertnicze, zwane „rdzeń", w ilości nie mniejszej niż ½ rdzenia przeciętego zgodnie z płaszczyzną równoległą do osi walca, pozostające w stanie nienaruszonym, bez śladów opróbowania tej części rdzenia;
- rdzeniki boczne – wszystkie, które nie były poddane badaniom powodującym zniszczenie oraz fragmenty pozostałe po wykonaniu badań.

Rozporządzenie dopuszcza przeprowadzenie badań powodujących całkowite zniszczenie próbki lub rdzenia, jednak odstępstwo to musi być określone w koncesji lub decyzji zatwierdzającej PRG.

Na Inwestorze (a pośrednio na wykonawcy otworu wiertniczego) spoczywa również obowiązek bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych w zakresie:

- parametrów otworu wiertniczego oraz wyników wykonanych w nim badań;
- parametrów i wyników wykonanych badań geofizycznych w otworze;
- wyników badań próbek uzyskanych w trakcie bieżąco prowadzonych prac geologicznych oraz badań rdzeni archiwalnych.

Rodzaj i szczegółowy zakres przekazywanych informacji otworowych jest również ściśle określony w Rozporządzeniu

w sprawie przekazywania informacji z bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych (Rozporządzenie..., 2015).

3.3.1. Opis i opróbowanie rdzenia wiertniczego

Na bieżąco, w trakcie wykonywania otworów wiertniczych przeprowadza się między innymi analizę stanu rdzenia wiertniczego oraz opis makroskopowy przewiercanych gruntów i skał. Niezbędnym elementem dokumentacyjnym jest również dokumentacja fotograficzna. W miarę możliwości wykonuje się także zaawansowane, nieinwazyjne, ciągłe techniki badawcze, takie jak tomografia komputerowa lub badania spektroskopowe. Z rdzenia wiertniczego pobierane są próbki do badań laboratoryjnych zgodnie z ustalonym w projekcie robót schematem badawczym, a rdzeń jest szczegółowo analizowany i opisywany pod kątem stratygraficznym, litologicznym i tektonicznym. Czynności te dotyczą także analizy i badań na archiwalnych rdzeniach wiertniczych zgromadzonych w NAG, wykonywanych na wcześniejszych etapach badawczych. Na etapie charakterystyki lokalizacji próbki powinny być pobrane w jak najkrótszym czasie od ich wydobycia, gdyż w warunkach powierzchniowych ulegają wysychaniu i odprężeniu.

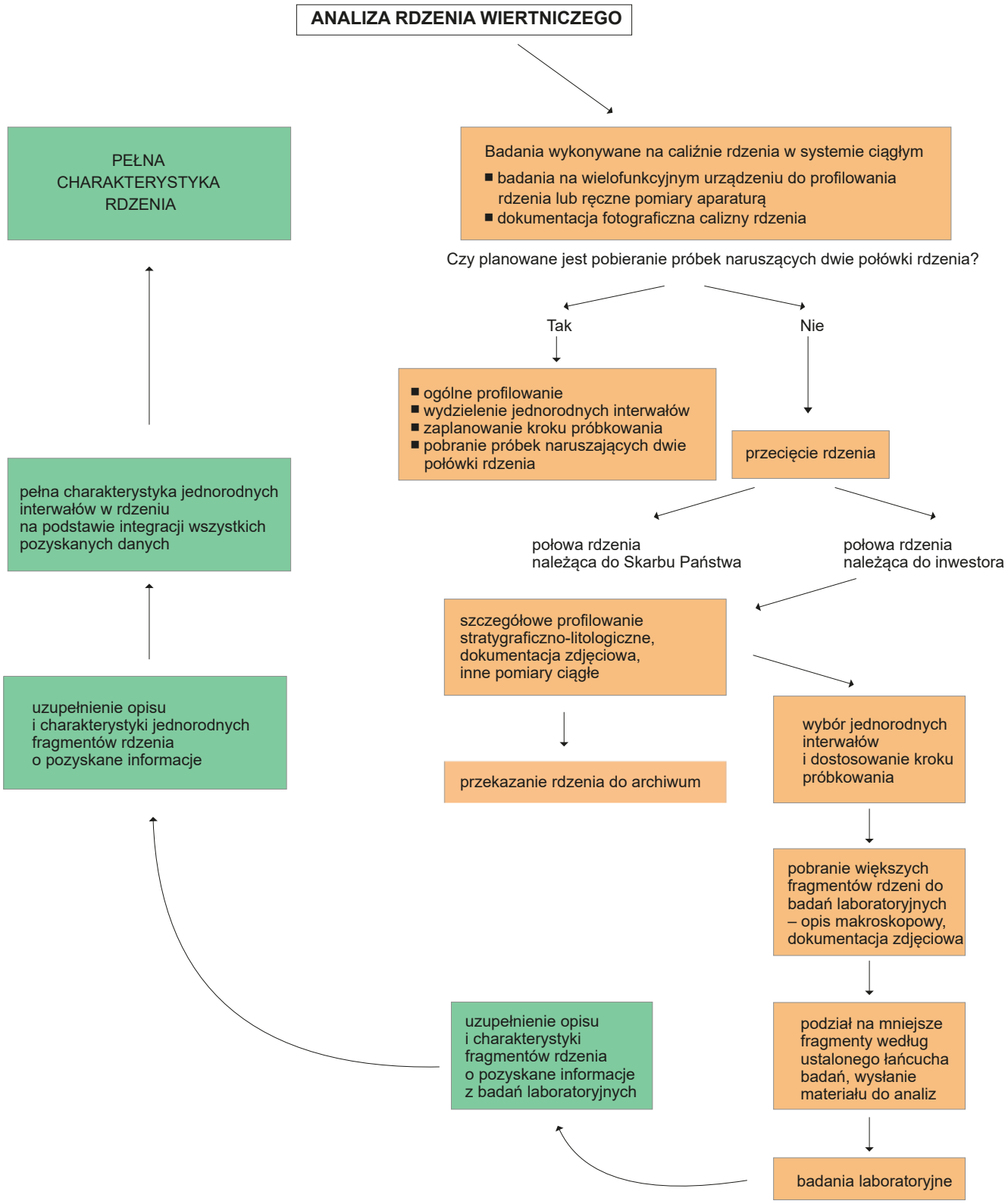
Analiza rdzenia wiertniczego dostarcza szczegółowych danych na temat właściwości materiału skalnego. Ze względu na wysokie koszty pozyskania rdzeni należy z największą starannością zaplanować wszystkie możliwe badania, tak żeby uzyskać maksimum informacji z tego niewielkiego fragmentu skalnego. Schemat postępowania z rdzeniem powinien być zaplanowany w taki sposób, aby wyniki wszystkich badań, począwszy od przeprowadzanych w najmniejszej skali (nano, mikro), mogły jak najpełniej charakteryzować interesujące formacje litostratygraficzne. Istotne jest zachowanie odpowiedniej kolejności działań, która pozwoli na pełną charakterystykę rdzeniowanego odcinka, w tym korelację informacji z rdzenia z innymi badaniami geofizycznymi z możliwością interpolacji pozyskanych danych na rejon sąsiedni. Analizę materiału rdzeniowego można podzielić na kilka etapów, których podsumowanie znajduje się na schemacie badawczym – rys. 61.

Na pierwszym etapie należy zapoznać się ze stanem rdzenia oraz porównać wyniki pozyskane w trakcie bieżących prac dokumentacyjnych podczas wiercenia. Przydatne jest porównanie wyników z aparatury kontrolno-pomiarowej (tak zwanego mudloggingu) i oznaczonej tam stratygrafii i litologii. Wstępny ogląd rdzenia jest szczególnie istotny w przypadku, kiedy jest obserwowana duża zmienność litologiczna i mogą występować potencjalne techniczne trudności w uzyskaniu odpowiedniej wielkości próbek do badań laboratoryjnych. To moment, w którym, mając powyższe na względzie, należy starannie zaplanować zakres niezbędnych i możliwych do wykonania badań i analiz. Badania te należy przeprowadzać na caliźnie rdzenia np. na wielofunkcyjnych stołach do skanowania rdzeni lub jeżeli nie ma do tego dostępu można wykorzystać aparaturę przenośną. W przypadku korzystania z wielozadaniowych stołów pomiarowych (ang. *multi-sensor core logger*) wykonuje się zdjęcia, profilowanie gamma (w tym analizy spektroskopowe), podatności magnetycznej, prędkości fali P, oporności, profilowanie spektrofotometryczne, fluorescencyjne, spektroskopię w podczerwieni, tomografię komputerową i wiele innych nieinwazyjnych badań w systemie ciągłym. W przypadku pomiarów ręcznych można wykonać np. analizy promieniowania gamma, podatności magnetycznej czy badania XRF. Badania te mogą służyć do korelacji głębokościowych pomiędzy pomiarami geofizyki otworowej a odcinkami rdzeniowanymi.

Makroskopowy opis analizowanych skał służy rozpoznaniu litologii i charakterystyki sedymentologicznej. Celem analizy makroskopowej rdzenia wiertniczego wykonywanego na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania jest ustalenie podstawowych cech jego tekstury (uwarstwiony, nieuwarstwiony, gruboziarnisty, drobnoziarnisty), charakteru nieciągłości: gęstości spękań, ich rozstawu i nachylenia względem poziomu oraz orientacji w kierunku północy (o ile rdzeń jest zorientowany) oraz charakteru ich powierzchni i rodzaju wypełnienia szczelin. Analizy mogą być rozszerzone o polową ocenę wytrzymałości kompresyjnej (ang. *unconfined compressive strength*), metodą zarysowania (ang. *scratch test*) lub punktową, na wybranych odcinkach rdzenia.

Opis makroskopowy powinien być szczegółowy, a skala dopasowana do zmienności stratygraficznej, litologicznej i teksturalnej, ponieważ tylko w ten sposób można uchwycić zmienne cechy masywu skalnego w profilu pionowym i dokonać właściwego doboru próbek do dalszych badań. Opis ten pozwoli na wydzielenie i kategoryzację warstw występujących w rdzeniu oraz wykrycie stopnia homogeniczności lub braku jednorodności opisywanych wydzieleń. Dodatkowo pozwoli na lokalną, a po zebraniu materiału z różnych wierceń regionalną analizę rozprzestrzenienia się warstw, potrzebną do budowy modelu geologicznego badanej przestrzeni wgłębnej. Opis powinien zawierać:

- litologię wyznaczoną metodami makroskopowymi, na podstawie zaobserwowanej zawartości minerałów podstawowych, zawartości węglanu wapnia oraz frakcji skały. Ważne jest stosowanie odpowiedniej i jednoznacznej klasyfikacji litologicznej. Jest wiele publikacji precyzujących makroskopowe wydzielenia litologiczne. Wybór, którą klasyfikacją należy się posłużyć, jest subiektywny. Ważne jest, żeby opisy te stosować konsekwentnie we wszystkich analizowanych rdzeniach oraz w sposób pozwalający na dowiązanie regionalne. Przy opisie rdzenia wiertniczego należy stosować zapisy aktualnej normy PN-EN ISO 14689:2018-05 w zakresie oznaczania i opisu skał. Szczegółowy opis litologiczny w skali makroskopowej może się różnić od późniejszych opisów petrograficznych dokonanych na mniejszych próbkach z badanego interwału. Niezwykle istotne jest, żeby po dokonaniu wszelkich badań zintegrować pozyskane informacje w skali makro i mikro;
- zaobserwowane tekstury i wszystkie widoczne struktury sedymentacyjne;
- struktury tektoniczne, w tym spękania;
- faunę;
- konkrecje mineralne;



Rys. 61. Schemat prac na rdzeniu związanych z profilowaniem, pozyskaniem próbek i interpretacją danych

– wszystkie inne elementy zaburzające pierwotną strukturę i teksturę skały.

Obserwacja powyższych elementów powinna mieć charakter nie tylko jakościowy, lecz też ilościowy. Należy wychwycić, czy obserwowane struktury są elementem dominującym w skale i cechą charakterystyczną dla danego interwału, czy też występują jako element akcesoryczny. Jest to szczególnie ważne w przypadku planowanego opróbowania rdzenia. Próbki powinny być wybierane z najbardziej reprezentatywnych fragmentów rdzenia z wykluczeniem interwałów o odmiennej, wyjątkowej tylko dla krótkiego interwału charakterystyce.

Kolejnym istotnym parametrem w obserwacji makroskopowej jest barwa skały. Zmiany kolorystyczne potrafią dać wiele wskazówek co do jakości i zmienności parametrów geochemicznych skały. Istotne jest, żeby, tak jak w przypadku odpowiedniej klasyfikacji litologicznej, stosować jednolity kod kolorystyczny. Dobrym przykładem jest stosowanie kodów literowo-cyfrowych opracowanych w zestawach typowych kolorów dla skał i gleb. Pozwala to na ujednolicenie nazewnictwa oraz zobiektywizowanie tego parametru.

Opis litologiczny powinien zostać uzupełniony o dokumentację zdjęciową. Dokumentacja powinna zawierać fotografie całego odcinka rdzeniowanego (dobrym przykładem jest: 1 zdjęcie = 1 skrzynka z rdzeniem). Jeżeli rdzeń jest przecięty, dokumentację zdjęciową powinno się wykonać na płaskiej powierzchni. Dodatkowo powinny zostać sfotografowane poszczególne, charakterystyczne fragmenty rdzeni, reprezentujące wydzielone jednorodne interwały, ale również i poszczególne struktury sedymentologiczne, tektoniczne, zaobserwowana fauna i wszystkie inne wyznaczone w trakcie profilowania interesujące odcinki rdzenia.

Prowadząc opis rdzenia wiertniczego, należy stosować zapisy aktualnej normy PN-EN ISO 14689:2018-05 w zakresie oznaczania i opisu skał (rozdz. 3.6.1.1), opisu materiału skalnego (rozdz. 3.6.1.2), opisu masywu skalnego oraz profilu wietrzeniowego (rozdz. 3.6.1.3).

Podczas opisywania rdzenia należy oznaczyć stan jego spękania przez wskaźniki masywu skalnego z rdzenia wiertniczego zgodnie z aktualną normą PN-EN ISO 14689:2018-05, PN-EN ISO 22475-1:2022-04, w tym (rys. 62):

– RQD (ang. *Rock Quality Designation*) – wskaźnik spękania masywu skalnego (syn.: wskaźnik podzielności rdzenia wiertniczego) – stosunek sumy długości wszystkich kawałków rdzenia wiertniczego, pomiędzy naturalnymi spękaniami, dłuższych od podwójnej średnicy rdzenia mierzonej wzdłuż osi rdzenia (Deere, 1964; Deere 1968 za Deere, 1989), do długości rdzenia wiertniczego (rdzeniowanego otworu), wyrażony w procentach (PN-EN 14689; Deere, Miller, 1966; Deere i in., 1967; Deere, 1989) (rozdz. 3.6.1.4);
– SCR (ang. *Solid Core Recovery*) – uzysk litego rdzenia – długość odcinków rdzenia w kształcie cylindrów, wyrażona w procentach;
– TCR (ang. *Total Core Recovery*) – całkowity uzysk rdzenia – całkowita długość uzyskanej próbki rdzenia, wyrażona w procentach;
– If (ang. *Fracture Index*) – stopień spękania – odległości pomiędzy poszczególnymi naturalnymi spękaniami wzdłuż rdzenia w odniesieniu do stref jednolitych, a nie w stosunku do całego rdzenia. Przedstawia się go jako minimum, moda, maksimum dla jednolitej strefy.

Do oceny szczelinowatości rdzenia wiertniczego można wykorzystać powszechnie stosowane wskaźniki: RQD, wskaźnik porowatości szczelinowej (*Ks*) oraz szczelinowatość liniową (S_l).

Wskaźnik porowatości szczelinowej (*Ks*), mający charakter wskaźnika liniowego, opisuje stratę rdzenia. Oznacza się go zgodnie z formułą:

$$K_s = \frac{\Delta R}{L_R} \cdot 100$$

gdzie:

Ks – wskaźnik porowatości szczelinowej [%],
ΔR – straty rdzenia wiertniczego [m],
L_R – długość odcinka otworu wiertniczego [m].

Ponieważ straty rdzenia wiertniczego zależą w pewnej mierze od sposobu wiercenia i użytego sprzętu wiertniczego, wskaźnik ten może służyć jedynie do wzajemnego porównywania skał przewierconych taką samą techniką robót wiertniczych.

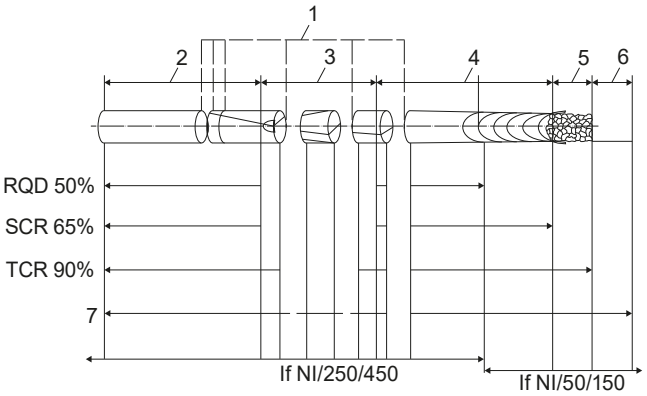
Szczelinowatość liniowa (S_l) wyraża liczbę spękań na jednostkę długości:

$$S_l = \frac{N}{L}$$

gdzie:

S_l – szczelinowatość liniowa [1/m],
N – liczba śladów spękań, szczelin [–],
L – długość linii pomiarowej [m].

Po wstępnych ocenach dokonuje się wyboru odcinków profilu do laboratoryjnych badań geomechanicznych. W dalszej kolejności rdzeń powinien zostać przecięty wzdłuż osi



Rys. 62. Ocena masywu skalnego na podstawie rdzenia wiertniczego wg PN-EN ISO 14689:2018-05; przetłumaczone

1 – pęknięcia rdzenia wywołane wierceniem, 2 – długość równa przynajmniej dwóch średnic rdzenia, 3 – rdzeń o długości mniejszej niż jedna średnica, 4 – długość równa przynajmniej dwóch średnic rdzenia, 5 – odcinek naruszony, 6 – brak uzysku, 7 – całkowita długość rdzenia

rdzenia. Sposób cięcia rdzenia powinien być dopasowany do cech litologicznych. Standardową metodą jest cięcie rdzenia na mokro, jednakże przy pewnych litologiach, ze względu na ryzyko zniszczenia rdzenia zalecane jest również cięcie na sucho. Jak już wspomniano, zgodnie z obowiązującym przepisami przynajmniej połowa rdzenia powinna zostać przekazana do Narodowego Archiwum Geologicznego w stanie nienaruszonym. Druga połowa, należąca do Inwestora, może być wykorzystana do poboru próbek. Niestety zabieg ten eliminuje możliwość zapewnienia odpowiedniej skali reprezentującej strukturę materiału. Uniemożliwia również i tak trudne dla rdzeni z dużych głębokości, dostosowanie kierunku wycięcia próbek do projektowanego kierunku badania, zapewniającego odpowiednie usytuowanie względem orientacji otworu oraz anizotropii naprężenia i odkształceń.

Do prawidłowego poboru próbek, na podstawie powyższego profilowania, należy wyznaczyć warstwy o tej samej charakterystyce litologicznej. Jednostki te powinny być rozpoznawalne na rdzeniu, lecz należy zwrócić uwagę czy powyższe wydzielenia można też zaobserwować w zmienności np. parametrów geofizyki otworowej. Przydatne do wydzielenia tych warstw oraz do korelacji z krzywymi geofizyki otworowej są, wspomniane powyżej, wszelkiego rodzaju nieinwazyjne badania, które można przeprowadzić na ciągłym odcinku rdzenia.

Dopiero po wyznaczeniu tych warstw można przystąpić do poboru próbek do analiz laboratoryjnych, uwzględniając kategorię poboru prób skał. W celu pełnego scharakteryzowania danych stref, próbki należy pobierać systematycznie w danym odcinku, unikając jednak miejsc, które są atypowe dla obszarów. Jest to szczególnie istotne w przypadku skał, z których trudno pobrać odpowiednio duże fragmenty rdzenia do badań. Przykładem są skały łupkowe, które często ulegają rozwarstwieniu na fragmenty (złupkowaceniu), co nie pozwala na wycięcie z nich odpowiedniej wielkości próbek do wszystkich badań petrofizycznych. W takiej sytuacji często pobiera się dostępny materiał skalny, nie zważając, że większy fragment wynika z odmiennej lokalnej cementacji i nie reprezentuje właściwości petrofizycznych większego odcinka rdzeniowanego. W przypadku badań, które nie są uzależnione od wielkości próbki warto narzucić krok próbkowania w skali uwzględniającej zmienność litologiczną warstw.

Wybrane próbki powinny być również odrębnie opisane litologicznie i sedymentologiczne w skali od centymetra do milimetra, wg tych samych kryteriów co opis makroskopowy oraz dokładnie sfotografowane.

Tak przygotowane próbki powinny następnie mieć zaplanowany łańcuch badań, zaczynając od wszystkich możliwych i potrzebnych badań, w których nie niszczy się próbek, po niszczące je badania laboratoryjne wykonywane na końcu. Do badań wytrzymałościowych wycina się próbki skalne w kształcie walca, odpowiednio zwymiarowane, o smukłości co najmniej 2 (relacja wysokości do średnicy próbki) oraz średnicy dostosowanej do struktury i tekstury skały, zapewniającej zminimalizowanie efektu skali (zalecana średnica 50 mm). Próbki powinny być zorientowane względem stropu i spągu warstw oraz należy je wycinać zgodnie z projektem badań wytrzymałościowych, w kierunku równoległym lub prostopadłym do osi rdzenia lub też pod odpowiednio dobranym kątem nachylenia. Pozostałości rdzenia należy zabezpieczyć i pozostawić do dalszych uzupełniających badań.

Końcową interpretację powinno się przeprowadzać, wykorzystując w pierwszej kolejności informacje pochodzące z badań laboratoryjnych, w celu nakreślenia charakterystyki mniejszych fragmentów wyciętych z rdzeni, w dalszej kolejności – warstw jednorodnych, aż do pełnej charakterystyki rdzenia wiertniczego. W efekcie zostają wydzielone jednorodne litologicznie warstwy – jednostki (CLUS – ang. *consistent lithological units*), które w toku dalszych prac mogą być podstawą do wydzieleń regionalnych i wkładem do konstrukcji dalszych modeli geologicznych dla projektowanych obiektów podziemnych.

3.3.2. Badania geofizyczne otworowe

Badania geofizyczne otworowe (tzw. geofizyka otworowa) to zespół różnych metod geofizycznych przeprowadzanych w otworach wiertniczych w trakcie ich wykonywania lub po ich wykonaniu. Do tego celu stosuje się odpowiednie sondy pomiarowe. W zależności od wybranej metody badania te mogą dostarczyć m.in. informacji na temat:

- litologii przewierconych warstw;
- temperatury górotworu;
- ciągłości górotworu, ewentualnych zaburzeń tektonicznych, anizotropii;
- szczelinowatości górotworu;
- chłonności górotworu;
- stanu technicznego otworu, rur okładzinowych i zacementowania;
- wybranych parametrów fizycznych skał (np. porowatość, przepuszczalność) oraz mechanicznych (sprężystych).

Badania geofizyki otworowej mogą być wykonywane w dwóch wariantach: na przewodzie wiertniczym oraz na specjalnym kablu. W przypadku badań na przewodzie wiertniczym stosuje się tzw. metodę LWD (ang. *logging while drilling*), polegającą na zamontowaniu urządzenia pomiarowego w końcowej części przewodu wiertniczego. Obecne techniki LWD pozwalają uzyskać zbliżone dokładności do profilowań z użyciem klasycznej sondy na kablu. Urządzenia pomiarowe wykorzystywane w tej technice to m.in. zestawy badawcze do pomiaru oporności, gęstości objętościowej, porowatości neutronowej, naturalnej promieniotwórczości oraz do analiz akustycznych. Powszechnie stosowane są sondy wpuszczane do otworu na specjalnym kablu (ang. *wireline logging*). Pomiar polega na opuszczaniu sondy pomiarowej (lub wielu sond) na dno otworu wiertniczego, a następnie podnoszeniu jej do góry z jednoczesną rejestracją wybranych parametrów górotworu (jest to najczęściej stosowana w głębokiej geofizyce wiertniczej tzw. technika *up-hole*). Sygnał przesyłany jest drogą kablową do aparatury ustawionej na powierzchni.

W Polsce pomiary geofizyczne z otworów pochodzących z lat wcześniejszych (większość pomiarów sprzed lat 80. ub. stulecia) zostały wykonane w większości analogową (a w późniejszym czasie również cyfrową) aparaturą rosyjską firmy

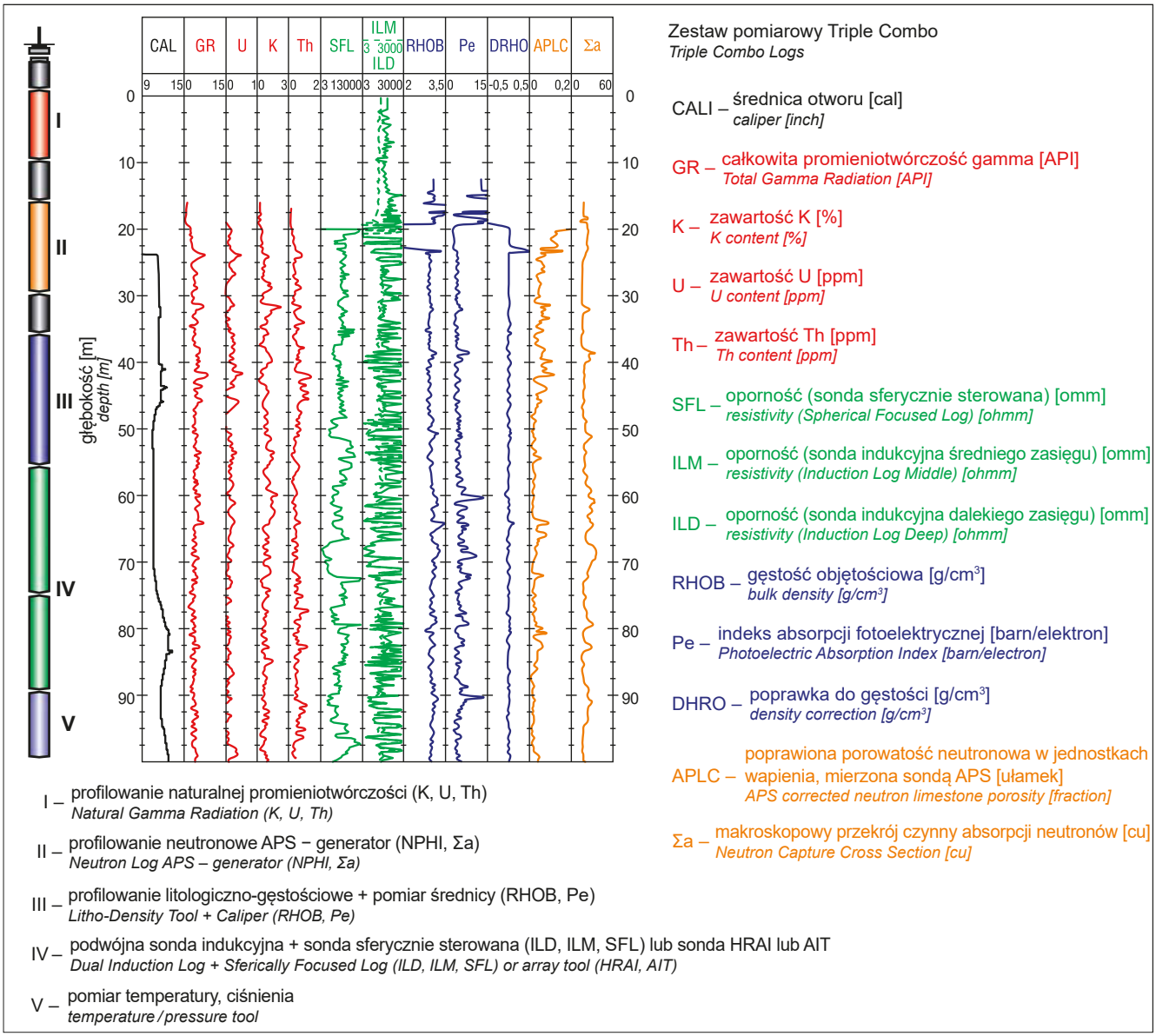
CAG. Są one zdecydowanie słabszej jakości oraz mniejsza jest również ilość i rodzaj wykonywanych sondowań niż tych rejestrowanych cyfrowo. Badania w Polsce są prowadzone aparaturą nowej generacji (np. firmy: Halliburton, Schlumberger, Tucker), która dostarcza dane o wyższej rozdzielczości i jakości.

Tradycyjny zestaw pomiarowy tzw. Triple Combo lub Quad Combo (tj. z dodatkowym profilowaniem akustycznym) składa się z sond służących do pomiaru (rys. 63):

- CALI – średnica otworu [cal];
- GR [API]– całkowitej promieniotwórczości gamma;
- K [%] – zawartości potasu K;
- Th [ppm] – zawartości toru;
- U [ppm] – zawartości uranu;
- SFL [Ωm] – oporności sferycznie sterowanej;
- ILM [Ωm] – oporności indukcyjnej średniego zasięgu;
- ILD [Ωm] – oporności dalekiego zasięgu;
- RHOB [Mg/m^3] – gęstości objętościowej;
- DRHO [Mg/m^3] – poprawki do gęstości;
- Pe [bar/elektron] – indeksu absorpcji fotoelektrycznej;
- APCL [ułamek] – poprawionej porowatości neutronowej w jednostkach wapienia sondą APS;
- ∑a [cu] – makroskopowego przekroju czynnego absorpcji neutronów.

W geofizyce otworowej wykorzystuje się głównie metody elektrooporowe, radiometryczne, akustyczne, sejsmiczne (rzadziej) i termometryczne. Zestawienie tych metod wraz z krótkim podsumowaniem zastosowań przedstawiono w tabeli 38.

Pomiary geofizyczne przed interpretacją są poddawane różnym procedurom poprawkowym, m.in. na średnicę otworu, gęstość płuczki, zawartość potasu w płuczce, temperaturę, ciśnienie hydrostatyczne, oporność płuczki itp. Interpretacji danych dokonuje się z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania z uwzględnieniem danych z otworu.



Rys. 63. Zestaw profilowań tradycyjnych Triple Combo (Zorski i in., 2013)

Tabela 38

Zestawienie metod badań geofizyki otworowej

Rodzaj metody	Rodzaj profilowania	Opis metody	Zastosowania
1	**2**	**3**	**4**
Metody elektrooporowe	profilowanie opornościowe (potencjałowe lub gradientowe)	zasada działania jak w klasycznych profilowaniach elektrooporowych; dla sond potencjałowych odległość między elektrodami pomiarowymi (M i N) jest znacznie większa niż między elektrodami A a M; dla sondy gradientowej odległość między elektrodami M a N jest znacznie mniejsza niż miedzy sondami A a M	służy do określenia rodzaju i wielkości przestrzeni porowej skał oraz ich nasycenia; wyznaczenie rzeczywistej oporności wymaga wykonania pomiaru przynajmniej trzema sondami; interpretacja ilościowa polega na eliminacji wpływu otworu oraz płuczki; z krzywych można wyinterpretować litologię oraz współczynnik porowatości
	sterowane profilowanie oporności	przez elektrodę prądową A0 przepływa prąd o stałej wartości; przez elektrody prądowe A1 i A2 przepuszcza się prąd o takiej samej biegunowości, ale o takim natężeniu, żeby różnica między elektrodami pomiarowymi M1 a N1 była równa zeru; wyznaczając oporność skały, mierzy się różnice potencjałów jednej z elektrod M1, N1 względem elektrody N oddalonej na znaczną odległość od elektrody prądowej	sterowane profilowania oporności ograniczają wpływ otworów na mierzoną oporność pozorną, dzięki czemu oporność pozorna jest bliska rzeczywistej wartości; z krzywych profilowań sterowanych interpretuje się litologię oraz porowatość, ma też zastosowanie w kontroli szczelności połączeń rurowych w otworze wiertniczym
	profilowanie indukcyjne	polega na pomiarze przewodności (oporności) na podstawie pomiaru wtórnego pola magnetycznego prądów wirowych indukowanych w badanym ośrodku	zaletą tego profilowania w porównaniu z innymi metodami elektrycznymi jest to, że nie wymaga ono kontaktu sondy ze skałą poprzez płuczkę; z krzywych można wyinterpretować litologię; stosuje się do skał o niskiej oporności (ilasto-piaszczystych)
	profilowanie potencjałów polaryzacji naturalnej (samoistnej)	pole elektryczne samoistnie występuje na granicy między warstwami nieprzepuszczalnymi (iły) i przepuszczalnymi (piaski); potencjał tego pola powstaje w rezultacie procesów elektrochemicznych zachodzących wokół odwiertu w układzie utwory ilaste, woda złożowa i płuczka; profilowanie potencjałów samoistnych wykorzystuje potencjały dyfuzji, adsorpcji, utleniania i redukcji, które w sposób naturalny występują w ośrodku skalnym	ma zastosowanie do wyznaczania litologii, określenia warstw przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, zasolenia wody złożowej, oceny zailenia, interpretacji środowisk sedymentacyjnych
	profilowanie potencjałów polaryzacji wzbudzonej	polega na pomiarze potencjałów malejących w czasie, po przejściu przez ośrodek prądu; potencjały te mogą powstać pod wpływem przepuszczenia przez otwór prądu elektrycznego (wzbudzenie elektryczne) lub przez dodanie do płuczki wiertniczej utleniacza, pod którego wpływem utleniany ośrodek oddaje elektrony – ładuje się dodatnio, a ośrodek redukujący przyjmuje elektrony – ładuje się ujemnie (wzbudzenie chemiczne)	stosuje się najczęściej do wykrywania ród siarczkowych oraz do określania zawartości rud w skale
Metody radarowe	otworowe pomiary georadarowe (ang. *borehole radar logging*); pionowe profilowania georadarowe (ang. *vertical radar profiling*)	polega na analizie zjawiska odbicia fali od powierzchni rozdzielającej warstwy ośrodka gruntowo-skalnego o różnych właściwościach elektrycznych; w metodzie georadarowej stosuje się fale elektromagnetyczne, a granice, na których dochodzi do odbicia fal, muszą różnić się wartościami przenikalności elektrycznej (ε [*F*/*m*])	badanie jest wykorzystywane w szczególności do oceny stref spękań w ośrodku skalnym i zaburzeń tektonicznych, a także identyfikacji pustek w górotworze
Metody akustyczne	profilowanie akustyczne	w metodzie akustycznej rejestruje się emitowaną przez urządzenie falę dźwiękową; w sondzie jest nadajnik emitujący impuls fal w paśmie akustycznym; fala rozchodzi się w ośrodku, ulega zjawiskom załamania odbicia, następnie jest rejestrowana przez odbiornik (1–4 sztuk) i określane są prędkości fali podłużnej i poprzecznej; standardowy pomiar przy profilowaniu akustycznym daje czas interwałowy; ważnym elementem w pomiarze jest stan otworu, dlatego analizuje się go z profilowaniem średnicy otworu – CALI	umożliwia określenie litologii i porowatości, modelu prędkościowego, akustyczne obrazowanie ściany otworu, strefy spękań, wyznaczanie dynamicznych parametrów sprężystości
Metody radiometryczne	profilowanie naturalnej promieniotwórczości gamma	polega na pomiarze promieniowania gamma zachodzącego pod wpływem samorzutnego rozpadu jąder niektórych atomów; naturalne promieniowanie zależy od zawartości pierwiastków promieniotwórczych, takich jak: uran, tor, rad czy izotopy potasu	stosuje się do określenia litologii, zailenia, zasobów minerałów promieniotwórczych
	profilowanie gamma gamma (gęstościowe lub selektywne)	polega na rejestracji natężenia promieniowania gamma rozproszonego w skałach; kwanty gamma są emitowane przez własne źródło promieniotwórcze zainstalowane w sondzie; ze względu na rodzaj źródła i sposób rejestracji wyróżnia się dwie metody: gęstościowe i selektywne	stosuje się do określenia litologii i porowatości, kontroli stanu zacementowania przestrzeni pozarurowej, wykrywania węglowodorów

Tabela 38 cd.

1	2	3	4
cd. Metody radiometryczne	profilowanie neutronowe	wykorzystywane są zjawiska zachodzące w skałach pod wpływem promieniowania neutronowego; sonda jest źródłem elektronów, które wnikają w skałę i ulegają spowolnieniu; spowolnienie neutronów jest najszybsze na protonach, jądrach atomów wodoru wchodzących w skład cząsteczek wody; spowolnione neutrony są w dużej części wychwytywane przez jądra pierwiastków wchodzących w skład skały; powstające w ten sposób izotopy są na ogół promieniotwórcze i emitują wtórne promieniowanie gamma	służy do interpretacji porowatości skały
	profilowanie neutron gamma	polega na pomiarze energii kwantów gamma pochodzących z interakcji neutronów z jądrami atomów, z których składa się skała; neutrony są emitowane sztucznie przez źródło umieszczone w sondzie; profilowanie to wykorzystuje wtórne promieniowania gamma wywołanego oddziaływaniem strumienia neutronów na skały; wynikiem jest porowatość neutronowa NPHI, gdzie HI to indeks wodorowy	służy do określania litologii i porowatości, indeksu wodorowego, oznaczania horyzontów gazonośnych
	profilowanie neutron neutron	polega na pomiarze rejestracji zmian gęstości neutronów od źródła, są w dwóch wariantach termicznych neutronów PNNt oraz nadtermicznych neutronów PNNnt	służy do określania litologii, porowatości i oznaczenia wilgotności skał oraz mineralizacji wody w ocenie jakościowej; dużym problemem podczas pomiarów jest stan otworu, który ma istotny wpływ na wynik pomiaru, z tego powodu obecnie tę metodę stosuje się bardzo rzadko
Metody sejsmiczne	pionowe profilowania sejsmiczne DH, fali P, fali S (ang. *downhole*)	wykorzystuje się pomiar czasu przejścia fali sejsmicznej od wybranego punktu do punktu pomiarowego zlokalizowanego na powierzchni ziemi; dodatkowo uzyskuje się wysokiej rozdzielczości obraz sejsmiczny na całej długości otworu; najnowsze urządzenia wykorzystują wibracje wytwarzane przez narzędzie wiertnicze jako źródło sejsmiczne	na podstawie prędkości fali P i S są interpretowane parametry sprężystości skał (współczynnik Poissona, moduł Younga, moduł ścinania)
	Profilowanie prędkości średnich (ang. *check shots*)	mierzy się czas przejścia fali z powierzchni do punktu pomiarowego na danej głębokości; fala jest generowana z zastosowaniem środków strzałowych	stosowane także w otworach kierunkowych; na podstawie prędkości fali P i S interpretowane są parametry sprężystości skał (współczynnik Poissona, moduł Younga, moduł ścinania)
	międzyotworowe prześwietlania sejsmiczne CH, fali P (CH-P), fali S (CH-S) (ang. *crosshole*)	strefy gradientów wartości prędkości fali P i prędkości fali S wyznaczają granice warstw gruntów i skał o odmiennych właściwościach mechanicznych i mogą być podstawą do korelacji między sondowaniami mechanicznymi	stosowane w geofizyce inżynierskiej do oceny parametrów sztywności gruntów i skał; minusem jest konieczna dostępność dwóch otworów w odpowiedniej odległości
Metody termometryczne	profilowanie temperatury w warunkach nieustalonej równowagi cieplnej	podstawowym warunkiem przeprowadzenia tego profilowania jest nieustalona równowaga cieplna w otworze wiertniczym; po przerwaniu krążenia płuczki w otworze następuje pobranie lub oddanie ciepła z otaczających skał; szybkość pobierania ciepła jest uzależniona od przewodności temperaturowej przewiercanych skał daje profil przewodności temperaturowej	służy do wykrywania dopływu wody do otworu, stanu zacementowania otworu oraz poszukiwań złóż geotermalnych; znajomość z kolei temperatury płuczki jest potrzebna do interpretacji pozostałych metod geofizycznych
	profilowanie temperatury w warunkach ustalonej równowagi cieplnej	profilowanie temperatury w warunkach ustalonej równowagi cieplnej wykonuje się po upływie co najmniej 10 dni od wiercenia i ustaleniu się równowagi cieplnej; w wyniku pomiaru oznacza się profil oporności cieplnej, ponieważ w tych warunkach przyrost temperatury jest proporcjonalny do cieplnej oporności właściwej skał	służy do mierzenia gradientu geotermalnego i wyznaczania gęstości strumienia cieplnego ziemi

Oprócz wyżej opisanych badań geofizycznych istnieje wiele istotnych badań otworowych rejestrujących stan techniczny otworu. Można do nich zaliczyć (Zych i in., 2018):

– **kawernomierz** do pomiarów średnicy otworu (CALI, BSM), służy do wprowadzania poprawek interpretacyjnych na stan otworu, do obliczania objętości otworu, do oceny miejsc korozji lub uszkodzeń rur okładzinowych. W powiązaniu z metodami geofizycznymi można za pomocą profilowania średnicy określać w sposób przybliżony stopień spękania górotworu oraz właściwości mechaniczne skał. Sondy (kawernomierze) są wyposażone w tzw. „ramiona", które podczas pomiaru są dociskane do ścianki otworu;
– **cementomierz akustyczny** do badania stanu zacementowania rur okładzinowych w wybranych interwałach głębokościowych;
– **imager (telewizor) akustyczny** do badania stanu otworu i grubości rur okładzinowych, rejestrujący naturalne profilowanie gamma, sygnał akustyczny odbity od ściany otworu oraz czas przejścia sygnału akustycznego od sondy do ściany otworu i z powrotem. Urządzenie to bardzo precyzyjnie reaguje na wszelkie uszkodzenia ścian otworu (kawerny, ubytki);
– **mikroimager elektryczny (XRMI)** do analizy naturalnych struktur sedymentacyjnych i tektonicznych oraz stanu technicznego otworu, urządzenie tworzy obrazy mikrooporności oraz i na podstawie ich zmian jest możliwe zlokalizowanie miejsc skawernowania ścian otworu (wyższe oporności);
– **inklinometr** do pomiarów krzywizny otworu.

Istnieje szereg czynników komplikujących wykonywanie pomiarów geofizycznych lub ich interpretację. Do nich zalicza się (Zorski i in., 2013):

– wpływ zmian średnicy otworu i stref okołootworowych, tworzonych w procesie wiercenia (np. wykruszenia, kawerny);
– zjawiska filtracji do skały z otworu i odwrotnie, zachodzące w trakcie jego wykonywania;
– obecność warstw cienkich, czyli takich których miąższość jest mniejsza od pionowego zasięgu sond; komplikacją są tu zróżnicowane zasięgi pionowe sond, zmieniające się w zakresie od kilku centymetrów do kilku metrów;
– złożona litologia skały, np. utwory piaszczysto-ilaste.

Z tego powodu interpretacji wyników badań geofizyki wiertniczej powinny dokonywać zespoły z dużym doświadczeniem, posiadające wypracowaną metodykę w zakresie kalibracji danych geofizyki wiertniczej z danymi otworowymi, interpretacji oraz odpowiednie narzędzia analityczne.

3.3.3. Badania otworowe inne

Otwory wiertnicze wykorzystuje się także do przeprowadzania otworowych testów *in situ*. Szczególnie istotne są wyniki **testów szczelinowania hydraulicznego**, które jako jedyne dostarczają bezpośrednich danych o wartości pierwotnego naprężenia poziomego (a dokładniej w kierunku prostopadłym do otworu wiertniczego) występującego w górotworze. Badanie to polega na zatłaczaniu w uszczelniony odcinek otworu płynu szczelinującego pod takim ciśnieniem, które jest w stanie rozsadzić ścianę otworu. Zabieg ten powoduje powstanie szczeliny, której płaszczyzna jest prostopadła do mniejszego naprężenia poziomego, a tym samym jest zgodna z kierunkiem większego naprężenia poziomego (Makówka i in., 2019). W momencie zakończenia zatłaczania płynu ciśnienie w szczelinie spada, a szczelina się zatrzaskuje. Wartość minimalnego naprężenia jest odczytywana z ciśnienia na dnie otworu w momencie zamknięcia szczeliny. Do szacowania wielkości naprężenia jest potrzebna rejestracja krzywych spadku ciśnienia w czasie. W przypadku stosowania niewielkich ilości (kilku m^3) płynu jest to tzw. mikroszczelinowanie, które generuje niewielki zasięg pionowy powstających szczelin. Celem tego testu jest ustalenie profilu gradientu szczelinowania, czyli przyrostu minimalnego naprężenia na jednostkę głębokości. Testy szczelinowania to więc jedyne badania, które dostarczają bezpośrednich danych o wartościach naprężeń pierwotnych występujących w górotworze.

Innym rodzajem testu otworowego jest **profilowanie gazowe**, podczas którego mierzy się zawartość węglowodorów, siarkowodoru oraz dwutlenku węgla na podstawie zmiany składu płuczki, nasyconej gazem pochodzącym ze skały (Dubiel, Ziaja, 2007). Zawartość gazów można także pomierzyć w warunkach laboratoryjnych pobierając wodę za pomocą próbnika złoża. Są to badania z grupy wgłębnych badań geochemicznych (Kidybiński, Siemek, 2006).

W otworach wiertniczych dla warstw skał zbiornikowych wykonuje się również **badania hydrogeologiczne**, wśród których do najistotniejszych należy zaliczyć:

– **badanie chłonności** – polega na pomiarach ciśnienia w otworze, podczas tłoczenia do niego płynu (np. wody) przy określonej wydajności, a następnie zamknięciu otworu wiertniczego i rejestrowaniu spadku ciśnienia; badanie pozwala także oszacować naprężenia pierwotne jest jednak ono mniej dokładne;
– **badanie próbnikiem złoża** – polega na pomiarach wartości ciśnienia oraz temperatury w otworze; obecnie powszechnie stosuje się wgłębne rejestratory ciśnienia, oparte na sensorach piezoelektrycznych (kwarcowych) oraz piezorezystancyjnych przystosowanych do pracy w środowisku o wysokiej temperaturze i ciśnieniu oraz wysokiej korozyjności. Są to rejestratory ciśnienia i temperatury, zaprojektowane głównie do pracy w otworach naftowych (Pikuła i in., 2019); wykorzystywane są także do monitorowania procesu szczelinowania skał zbiornikowych;
– **próbne pompowanie** – najczęściej wykonywane w hydrowęźle, jest to główne badanie pozwalające na obliczenie podstawowych parametrów hydrogeologicznych warstwy wodonośnych. W metodzie hydrowęzła pomiarów dokonuje się zarówno w otworze pompowanym, jak i w otworach obserwacyjnych odpowiednio od niego oddalonych. Metoda próbnego pompowania jest szczegółowo opisana w literaturze oraz w poradnikach metodycznych (np. Dąbrowski, Przybyłek, 2005). Pomiarów dokonuje się z zastosowaniem nowoczesnych

urządzeń pomiarowych (często z pomiarem ciągłym, transmitowanym na powierzchnię).

W otworach wiertniczych dla warstw skał uszczelnienia wykonuje się **badania hydrodynamiczne i hydrogeochemiczne**, wśród których do najistotniejszych zaliczono (Macuda, Zawisza, 2006):

– **badania zmian ciśnień piezometrycznych (złożowych) pomiędzy otworami obserwacyjnymi a eksploatacyjnymi** – zazwyczaj wykorzystuje się dwa rodzaje badań, które różnią się sposobem interpretacji wyników:
  - **badanie interferencyjne** – do interpretacji wyników wykorzystuje się model Theisa, metodę punktu przegięcia sygnału, metodę krzywych wzorcowych oraz używając symulatora przepływów niestacjonarnych,
  - **badanie pulsacyjno-interferencyjne** – dane zbierane są zwykle z dwóch przyrządów, a właściwe przefiltrowanie sygnału jest warunkiem koniecznym do przeprowadzenia dalszej analizy hydrodynamicznej;
– **badanie za pomocą próbnika RFT** (ang. *Repeat Formation Tester*) – badania polegające na pomiarach przepuszczalności pionowej skał oraz określeniu izolacji poszczególnych warstw wodonośnych próbnikiem RFT;
– **badania zmian ciśnień piezometrycznych (złożowych) pomiędzy warstwami wodonośnymi połączone z badaniami hydrogeochemicznymi** – badania te polegają na pomiarze ciśnień piezometrycznych (złożowych) w warstwach wodonośnych występujących w strukturze i/lub w nadkładzie struktury przeznaczonej na podziemny obiekt, które są połączone z analizą chemiczną próbek wody pobieranych z każdej warstwy wodonośnej. Badania te można wykonać przed lub po rozpoczęciu magazynowania substancji/składowania odpadów.

3.4. SONDOWANIA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

Sondowania geologiczno-inżynierskie mogą być wykorzystane do charakterystyki podłoża na potrzeby projektowania części naziemnej obiektu podziemnego. Można wykorzystywać do tego celu sondowania statyczne (CPTU) do oceny litologicznej warstw w podłożu oraz oceny parametrów (głównie wytrzymałościowych i stanu), sondowania dynamiczne (DP) do oceny zagęszczenia podłoża, badania dylatometryczne (DMT) lub presjometryczne różnego typu (PMT) do oceny parametrów odkształceniowych i inne w zależności od potrzeb (np. z dodatkowym modułem sejsmicznym lub opornościowym). Metody te są szczegółowo opisane w innych, zbiorczych publikacjach dotyczących różnych metod badań geologiczno-inżynierskich (np. Majer i in., 2018; Tarnawski, 2020).

3.5. BADANIA LABORATORYJNE GRUNTÓW

Badania laboratoryjne gruntów wykonuje się właściwie tylko do charakterystyki podłoża na potrzeby projektowania części naziemnej obiektu podziemnego. Badania te służą do opisu i klasyfikacji gruntów oraz do określenia ich właściwości fizyczno-mechanicznych. Można je wykorzystać do ewentualnej kalibracji z wynikami sondowań geologiczno-inżynierskich. Grunty należy oznaczać i opisywać zgodnie aktualną normą PN-EN ISO 14688-1:2018-05 oraz klasyfikować zgodnie aktualną normą PN-EN ISO 14688-2:2018-5 (Majer i in., 2021a–c). Badania właściwości fizycznych obejmują najczęściej określenie wilgotności naturalnej, uziarnienia, granic konsystencji, gęstości oraz zawartości części organicznych. Właściwości mechaniczne to głównie ocena parametrów wytrzymałościowych (wytrzymałości na ścinanie, spójności i kąta tarcia wewnętrznego) oraz odkształceniowych (moduły ściśliwości). Badania te są typowe a większość z nich jest znormalizowana (normy PN-EN powiązane z Eurokodem 7). Są one także szczegółowo opisane w przekrojowych publikacjach dotyczących różnych metod badań geologiczno-inżynierskich (np. Majer i in., 2018) lub w wytycznych branżowych funkcjonujących w budownictwie (Wytyczne..., 2019; Majer, Sokołowska, 2021).

3.6. BADANIA LABORATORYJNE SKAŁ

Badania laboratoryjne próbek skał, na potrzeby bezzbiornikowego podziemnego magazynowania i podziemnego składowania, prowadzi się w celu określenia cech petrofizycznych i geomechanicznych skał kolektorskich i skał uszczelnienia, a także na potrzeby ich klasyfikacji. Badania laboratoryjne zaleca się wykonywać zgodnie z metodami opisanymi przez *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM) (instrukcje ISRM – Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2014), normami z katalogu Polskich Norm (PN), normami zagranicznymi np. *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *Japanese Industrial Standards* (JIS) oraz procedurami stosowanymi przez laboratoria lub opisanymi w literaturze (np. Hobler, 1977; Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b; Tajduś i in., 2012).

Na potrzeby poradnika, opierając się na normach i pozycjach literatury[42], zaproponowano następujący podział badań laboratoryjnych skał:

– badania klasyfikacyjne;
– badania petrofizyczne;
– badania geomechaniczne.

Badania klasyfikacyjne obejmują oznaczanie, opis i klasyfikowanie skał wg normy PN-EN ISO 14689 (patrz: cz. II, rozdz. 3.6.1).

[42] PN-EN 1997-2:2009; prEN 1997-2:2022 (E); instrukcje ISRM (Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2014); Hobler, 1977; Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b; Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013; Wytyczne..., 2019.

Badania petrofizyczne i geomechaniczne mają na celu określenie właściwości fizyczno-mechanicznych próbek skał (patrz: cz. II, rozdz. 4) za pomocą różnych metod badawczych (patrz:cz. II, rozdz. 3.6.2–3.6.3).

Zakres badań laboratoryjnych próbek skał na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej powinno się dobierać w zależności od charakterystyki górotworu, rodzaju obiektu podziemnego, rodzaju substancji przeznaczonej do magazynowania lub rodzaju odpadu przeznaczonego do składowania, uwzględniając etap inwestycji, a także do potrzeb modelowania numerycznego i wymagań projektowych. Ogólne wskazówki do ustalania zakresu badań laboratoryjnych próbek skał w zależności od tego czy pełnią one funkcję kolektora, czy uszczelnienia podano w rozdziałach 3.6.4 i 3.6.5.

W badaniach laboratoryjnych w zależności od rodzaju badania stosuje się próbki skał odpowiedniej kategorii pobierania (PN-EN ISO 22475-1:2022-04; PN-EN 1997-2:2009; rozdz. 3.3). Norma PN-EN ISO 22475-1:2022-04 pozwala na oszacowanie możliwej klasy jakości próbki skał na postawie jakości rdzenia wiertniczego (tab. 36). Na tej podstawie dobiera się próbki skał tak, żeby miały odpowiednią kategorię i klasę jakości (tab. 37).

Laboratoryjne badania parametrów petrofizycznych i geomechanicznych skał wykonuje się na odpowiednio przygotowanych próbkach. Sposób przygotowania próbek oraz ich wymiary określono w normach, procedurach lub literaturze, w zależności od potrzeb badawczych.

Każde badanie petrofizyczne oraz geomechaniczne powinno być poprzedzone analizą makroskopową pojedynczych próbek skał w celu weryfikacji opisów analizy makroskopowej wykonanej na rdzeniu wiertniczym w warunkach terenowych (rozdz. 3.3.1). Każda próbka powinna być ewidencjonowana obrazem fotograficznym służącym do identyfikacji i porównań defektów lub innych elementów strukturalnych mających wpływ na interpretację rezultatów badań geomechanicznych po zniszczeniu próbki. Dane należy zestawić w karcie dokumentacyjnej próbki.

3.6.1. Badania klasyfikacyjne

Zasady oznaczania, opisu i klasyfikacji skał oraz profilu wietrzeniowego ujęto w normie PN-EN ISO 14689 (np. Pinińska, 2000a, b, 2017; Majer i in., 2018; Wytyczne..., 2019; Majer, Sokołowska, 2021). Badania klasyfikacyjne zaleca się wykonywać zgodnie z aktualną wersją normy PN-EN ISO 14689, ponieważ zawiera ona szczegółowe informacje na temat procedur, których należy przestrzegać podczas identyfikacji i opisu skał. Zgodnie z normą PN-EN ISO 14689:2018-5 (wersja aktualna) opis skał obejmuje następujące czynności:

– **oznaczenie i opis skały;**
– **opis materiału skalnego;**
– **opis masywu skalnego.**

Poziom szczegółowości opisu będzie zależał od wielkości i stanu zachowania się odsłonięcia lub rdzenia wiertniczego. Na poziom szczegółowości opisu będzie również miała wpływ jakość próbek dostępnych do opisu, która jest uwarunkowana rodzajem zastosowanych technik wiertniczych oraz technik pobierania próbek skał.

Prace dotyczące oznaczania, opisu i klasyfikacji skał powinny przeprowadzać osoby posiadające wiedzę geologiczną oraz odpowiednie kwalifikacje, umiejętności i doświadczenie w tym zakresie.

W badaniach klasyfikacyjnych skał istotne są poniższe definicje (PN-EN ISO 14689:2018-5):

– **skała** – naturalnie występujące nagromadzenie lub zbiór ziaren mineralnych, kryształów lub cząstek mineralnych zagęszczonych, scementowanych lub w inny sposób powiązanych ze sobą, których nie można zdezintegrować w wodzie za pomocą rąk. Uwaga: skała posiada generalnie większą wytrzymałość niż grunt;
– **materiał skalny** – nienaruszona skała między nieciągłościami;
– **masyw skalny** – skała składająca się z nienaruszonego materiału skalnego wraz z nieciągłościami i strefami wietrzenia;
– **rodzaj skały** – naturalne nagromadzenie jednego lub więcej minerałów lub fragmentów skał określone na podstawie ich składu petrograficznego, przeważającego wymiaru ziarna, struktury, tekstury i genezy;
– **spoiwo** – masa materiału skalnego, w której tkwią większe kryształy, ziarna mineralne lub okruchy skał[43],
– **tekstura** – rozmiar, kształt i ułożenie ziaren lub kryształów tworzących skałę;
– **struktura** – układ warstw, fałdów, uskoków i nieciągłości w masywie skalnym, które dzielą masyw na poszczególne fragmenty lub bloki skalne;
– **foliacja** – kierunkowe rozmieszczenie składników mineralnych w każdym rodzaju skały (zwłaszcza struktura równoległa), wywołane spłaszczeniem, segregacją lub innymi procesami, którym podlegały ziarna w skałach metamorficznych. Oryginalna foliacja może zostać zakłócona przez fałdowanie lub uskoki podczas procesów tektonicznych;
– **nieciągłość** – powierzchnia oddzielności w masywie skalnym, otwarta lub zamknięta, która może być rozwarta w wyniku wzrostu lub zmniejszenia naprężenia wywołanego pracami inżynierskimi[44];
– **system nieciągłości** – układ nieciągłości dzielących masyw skalny na poszczególne bloki skalne (podano definicje z normy PN-EN ISO19489-1:2006; brak definicji w normie PN-EN ISO 14689:2018-5).

Opisując barwę skał, materiału skalnego i masywu skalnego należy korzystać ze specjalnych wzorników lub podawać kolor podstawowy, zabarwienie i odcień na świeżej powierzchni skały w dobrym świetle. Pierwszy element koloru powinien określać odcień, drugi barwę podstawową np.: żółtawoczerwony. Do oznaczenia barwy można dodać informację o intensywności koloru stosując przymiotnik jasny, ciemny, np.: jasnozielona, jasnożółtobrązowa. W przypadku, gdy skała charakteryzuje się dwiema barwami jednocześnie,

[43] Masa wypełniająca może mieć charakter drobnoziarnisty, szklisty lub amorficzny.

[44] Przykład: warstwowanie, cios, szczelina, kliważ, uskok.

to wtedy kolor można zapisać z myślnikiem, np. żółto-czerwony (tab. 39). Przy oznaczaniu zawartości węglanów należy stosować kwas solny o stężeniu 10%. Podczas opisu każdej skały i zwietrzeliny zaleca się podawać genezę skał.

3.6.1.1. Oznaczanie skały

Oznaczanie rodzaju skały polega na określeniu następujących cech skały (PN-EN ISO 14689:2018-5):

- **grupy genetycznej skał**: osadowa (klastyczna, chemiczna, organogeniczna), metamorficzna, magmowa (plutoniczna, wulkaniczna), scementowane strefy zwietrzałych skał (tab. 40);
- **struktury**: warstwowa, foliacyjna, masywna (bez nieciągłości), izotropowa, anizotropowa;
- **wielkości ziaren** (uziarnienia) określane w zależności od rodzaju skały, np. zgodnie z tabelą 40;
- **składu mineralnego**: kwarc, skalenie, inne minerały krzemianowe; minerały ciemne (np. biotyt, amfibole, pirokseny); węglany (np. kalcyt, dolomit); krzemionka bezpostaciowa (np. szkliwo); substancja węglista (np. węgiel, grafit); ewaporaty (np. halit [sól kamienna], gips); minerały pęczniejące (np. anhydryt, minerały ilaste); siarczki (np. piryt);
- **pustek**: pierwotnych (np. bąble gazowe w skałach wulkanicznych) i wtórnych (np. z rozpuszczania);
- **formacji geologicznej**, nazwy regionalnej lub lokalnej (jeśli jest stosowana) oraz wieku skały;
- **barwy** zgodnie ze wskazówkami w rozdziale 3.6.1;
- **nazwy i symbolu** skały, np. zgodnie z tabelą 40.

Oznaczenie litologii skał jest niezbędne do charakterystyki budowy geologicznej danego obszaru, skorelowania profili geologicznych stwierdzonych w otworach wiertniczych, a także do odróżnienia głazów, porwaków od podłoża skalnego. Do oznaczania skał należy wykorzystywać mapy geologiczne i inne dane geologiczne.

W praktyce w celu klasyfikacji skał osadowych wg kryterium uziarnienia są stosowane inne klasyfikacje opisane w literaturze (np.: Dunham, 1962; Hallsworth, Knox, 1999).

W przypadku skał osadowych krzemionkowych różnice opierają się głównie na frakcjach granicznych, proporcjach poszczególnych frakcji oraz (co nie zostało zaznaczone w normie PN-EN ISO 14689:2018-05) na zawartości spoiwa typu masa wypełniająca (tzw. matriks). Wyróżnia się skały: **psefitowe** (żwiry, zlepieńce, brekcje), gdzie >50% ziaren mineralnych lub litoklastów stanowią składniki większe niż 2 mm; **psamitowe** – skały średniookruchowe (piaski, piaskowce, arkozy, szarogłazy), gdzie przeważają ziarna o wielkości 0,1–2,0 mm; **aleurytowe** – skały drobnookruchowe o wielkości ziarna 0,01–0,1 mm (mułowce); **pelitowe** zbudowane z cząstek <0,01 mm (łupki piaszczysto-mułowcowo-ilaste, mułowce ilaste).

Skały osadowe mogą być luźne lub scementowane substancjami mineralnymi. Do najczęściej występujących cementów należą spoiwa kalcytowe, krzemionkowe, żelaziste lub wyżej wymieniony matriks zbudowany z ziaren frakcji aleurytowej i pelitowej (Hallsworth, Knox, 1999). Ze względu na udział matriks wyróżnia się arenity (<15% matriks) oraz waki (>15%). Do skał silnie wzbogaconych w okruchy skalne dodaje się przymiotnik lityczne, np.: arenity lityczne, waki lityczne. Skały obfitujące w skalenie nazywane są arenitami arkozowymi, piaskowcami arkozowymi (Hallsworth, Knox, 1999). Z kolei przykładem waki litycznej jest szarogłaz (tab. 40).

Skały osadowe węglanowe, ze względu na genezę i związane z nią cechy teksturalne, dzieli się na (Plewa M., Plewa S., 1992):

- wapienie pelitowe (mikrogranularne), zbudowane z ziaren <20 μm;
- wapienie gruzłowe, zbudowane konkrecji mikrogranularnej;
- wapienie oolitowe, kuliste konkrecje węglanowe powstałe wokół detrytycznego jądra;
- wapienie organogeniczne, zlepione elementy szkieletowe i skorupy;
- wapienie rafowe, utworzone przez organizmy rafotwórcze (korale, mszywioły, algi);
- dolomity, o naturze wczesno- i późnodiagenetycznej, zbudowane głównie z minerałów dolomitów i Mg-kalcytów.

Tabela 39

Określenia intensywności, odcieni i barw do oceny barwy skały (wg PN-EN ISO 14689:2018-05)

Intensywność (cecha trzeciego rzędu)	Odcień (cecha drugiego rzędu)	Barwa (cecha pierwszego rzędu)
jasna – ciemna	czerwonawy różowawy pomarańczowawy żółtawy brązowawy zielonawy niebieskawy szarawy	czerwona różowa pomarańczowa żółta kremowa brązowa zielona niebieska biała szara czarna

Tabela 40

Przewodnik do nazywania skał (PN-EN ISO 14689:2018-05)

<table>
<tr><th colspan="7">Rodzaj skały osadowej
Sedimentary rock types</th></tr>
<tr><th rowspan="2">Wielkość ziaren
Grain size</th><th rowspan="2">Krzemionkowe
Siliceous</th><th colspan="2">Organogeniczne
Biogenic</th><th rowspan="2">Wulkaniczne
Volcanic</th><th rowspan="2">Węgle
Carbonaceous</th><th rowspan="2">Ewaporaty
Evaporates</th></tr>
<tr><th>niskoporowate
low porosity</th><th>porowate
porous</th></tr>
<tr><td>>20,0 mm</td><td rowspan="3">konglomerat
(zlepieniec)
conglomerate
brekcja
breccia</td><td rowspan="9">wapień
limestone
dolomit
dolomite</td><td rowspan="3">kalcyrudyt
calcirudite</td><td rowspan="3">aglomerat
agglomerate
brekcja wulkaniczna
volcanic breccia</td><td rowspan="6">–</td><td rowspan="9">halit
halite
anhydryt
anhydrite
gips
gypsum
trawertyn
travertine</td></tr>
<tr><td>6,3–20,0 mm</td></tr>
<tr><td>2,0–6,3 mm</td></tr>
<tr><td>0,63–2,0 mm</td><td rowspan="3">piaskowiec
sandstone
szarogłaz
greywacke</td><td rowspan="3">kalkarenit
calcarenite</td><td rowspan="3">tuf
tuff</td></tr>
<tr><td>0,2–0,63 mm</td></tr>
<tr><td>63–200 µm</td></tr>
<tr><td>2–63 µm</td><td>pyłowiec
siltstone</td><td>kalcysiltyt
calcisiltite
kreda pisząca
chalk</td><td>tuf drobnoziarnisty
fine tuff</td><td rowspan="2">węgiel
coal
lignit
lignite</td></tr>
<tr><td><2 µm</td><td>iłowiec
claystone
mułowiec
mudstone</td><td>kalcylutyt
calcilutite</td><td>tuf bardzo drobnoziarnisty
very fine tuff</td></tr>
<tr><td>Skrytokrystaliczny
Crypto-crystalline</td><td>krzemień
flint
czert
chert</td><td colspan="5">–</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="4">Rodzaj skały magmowej
Igneous rock types</th><th colspan="2">Rodzaj skały metamorficznej
Metamorphic rock types</th></tr>
<tr><th>Wielkość ziaren
Grain size</th><th>Kolor jasny
(kwaśne,
felsytowe)
Light coloured
(acidic)</th><th>Kolor od bardzo
jasnego do ciemnego
(obojętne)
Varying light to
dark coloured</th><th>Kolor ciemny
(zasadowe,
maficzne)
Dark coloured
(basic)</th><th>Poddane procesowi
foliacji
Foliated</th><th>Inne
Other</th></tr>
<tr><td>Grube
Coarse
>5,0 mm</td><td>granit
granite</td><td>dioryt
diorite</td><td>gabro
gabbro</td><td>gnejs
gneiss</td><td>marmur
marble</td></tr>
<tr><td>Średnie
Medium
1,0–5,0 mm</td><td>mikrogranit
micro-granite</td><td>mikrodioryt
micro-diorite</td><td>diabaz
dolerite</td><td>łupek krystaliczny
schist</td><td>kwarcyt
quartzite</td></tr>
<tr><td>Drobne
Fine
0,5–1,0 mm</td><td>ryolit
rhyolite</td><td>andezyt
andesite</td><td>bazalt
basalt</td><td>łupek
slate</td><td>hornfels
hornfels</td></tr>
<tr><td>Skrytokrystaliczny
Crypto-crystalline
<0,5 mm</td><td>–</td><td colspan="2">szkło wulkaniczne/obsydian
volcanic glass/obsidian</td><td>–</td><td>–</td></tr>
</table>

Skutecznym i wciąż aktualnym sposobem klasyfikacji skał osadowych węglanowych jest klasyfikacja zaproponowana przez Dunhama (1962). Klasyfikacja w dużym uproszczeniu opiera się na wielkości materiału ziarnowego budującego skałę. Granicę stanowi 20 µm – wszystko powyżej traktowane jest jak ziarno (ang. *grain*), natomiast wszystko poniżej to muł węglanowy (ang. *mud*). Zaproponowany przez Dunhama podział w sposób jednoznaczny ma odnosić się do warunków hydrodynamicznych środowiska sedymentacji. Autor w żaden sposób nie określa składu mineralnego ziaren oraz ich proweniencji (materiał auto-/allochtoniczny). W swojej klasyfikacji wydziela:

– *mudstone* – skały zbudowane z mułu węglanowego, zawierające mniej niż 10% rozproszonych składników ziarnistych, powstają w spokojnych stagnujących wodach umożliwiających sedymentacje drobnych cząstek o wielkości mniejszej niż 20 µm, skały typu *mudstone* są synonimem kalcylutytów;
– *wackestone* – skały zbudowane z mułu węglanowego, zawierające więcej niż 10% rozproszonych składników ziarnistych;
– *packstone* – skały węglanowe mające szkielet ziarnowy, zawierające muł węglanowy w przestrzeni intragranularnej, sposób ich powstawania może być związany m.in. z kompakcją wakstonów nad produkcją biodetrytusu w spokojnych wodach lub może powstawać na drodze bioturbacji; jego genezy nie można wiązać bezpośrednio z hydrodynamiką środowiska sedymentacji;
– *grainstone* – skała węglanowa kompletnie pozbawiona mułu węglanowego, jest wskaźnikiem środowiska dynamicznego i charakteryzuje się wysoką porowatością, ogólnie jego powstawanie jest związane z wysoką hydrodynamiką środowiska sedymentacyjnego, które wymywa w dalsze rejonu basenu muł węglanowy; geneza grainstonów może być również bardziej złożona – mogą powstawać na drodze bypassingu mułu węglanowego lub też w trakcie gwałtownej depozycji materiału ziarnistego w stagnujących wodach basenu depozycyjnego;
– *boundstone* – skała węglanowa wstęgowa, która koncepcyjnie odpowiada wapieniom biohermalnym;
– *crystalline carbonates* – zespół skał węglanowych, w których diageneza zatarła wszelkie wskazówki potrzebne do interpretacji środowiska sedymentacji, zawiera liczne ślady świadczące o dawnej obecności organizmów morskich (krynoidy, gąbki). Podział wg klasyfikacji dla skał zmienionych diagenetycznie.

3.6.1.2. Opis materiału skalnego

Opis materiału skalnego, poza oznaczaniem skały zgodnie z rozdziałem 3.6.1.1, obejmuje następujące cechy (PN-EN ISO 14689:2018-05):

– barwa, zgodnie ze wskazówkami w rozdziale 3.6.1;
– wielkość ziaren (uziarnienia), określone w zależności od rodzaju skały, np. zgodnie z tabelą 40;
– wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, określana w terenie na podstawie tabeli 41. W szczególnych przypadkach można stosować także inne metody oznaczania skał, które należy szczegółowo opisać w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, np. oznaczanie skał wg Protodiakonowa (Pinińska, 2001b);
– zmiany wietrzeniowe (terminy: świeży, przebarwiony, rozluźniony, rozłożony);
– zawartość węglanów (terminy: skała bezwapnista, skała lekko wapnista, skała wapnista, skała silnie wapnista);
– degradacja materiału skalnego ze względu na: odporność skały w warunkach atmosferycznych (terminy: odporny, słabo odporny, nieodporny) oraz odporność skały na rozmakanie (po 24 h) (terminy: odporna [klasa 1], mało odporna [klasy 2 i 3], nieodporna [klasy 4 i 5]).

3.6.1.3. Opis masywu skalnego

Masyw skalny (syn. górotwór, ośrodek skalny) to element strukturalny górotworu występujący w warunkach *in situ*, zbudowany z różnych skał uformowanych w wyniku różnorodnych procesów skałotwórczych i tektonicznych, obejmujący: powierzchnie uwarstwienia, cechy strukturalne, nieciągłości (np. fałdy, uskoki, pęknięcia) oraz strefy wietrzenia (Tajduś i in., 2012; PN-EN ISO 14689:2018-05). Z uwagi na jego cechy, opis masywu skalnego, który potencjalnie można zagospodarować na obiekt podziemny, powinien uwzględniać następujące aspekty (PN-EN ISO 14689:2018-05):

– rodzaj wydzielonych skał;
– strukturę i warstwowanie;
– nieciągłości;
– wietrzenie;
– wszelkie przejawy wód podziemnych.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 14689:2018-05 opis masywu skalnego, poza oznaczaniem skały zgodnie z rozdziałem 3.6.1.1, obejmuje następujące cechy:

– strukturę (terminy: skały osadowe – warstwowana, warstwowana z przewarstwieniami, laminowana, fałdowa, masywna, frakcjonalna; skały metamorficzne – kliważowa, foliacyjna, łupkowa, pasmowa, linearna, gnejsowa, fałdowa; skały magmowe – masywna, spływowa, fałdowa, linearna);
– warstwowanie masywu skalnego (terminy: warstwy drobnolaminowane [rozstaw <6 mm], grubolaminowane [rozstaw 6–20 mm], bardzo cienkie [rozstaw 20–60 mm], cienkie [rozstaw 60–200 mm], średnie [rozstaw 200–600 mm], grube [rozstaw 600–2000 mm], bardzo grube [rozstaw >2000 mm]);
– nieciągłości:
  • pomiary upadu (maksymalne nachylenie) i kierunku upadu (azymut upadu),
  • rozstaw nieciągłości (terminy: rozstaw skrajnie mały [rozstaw <20 mm], bardzo mały [rozstaw 20–60 mm), mały [rozstaw 60–200 mm], średni [rozstaw 200–600 mm], duży [rozstaw 600–2000 mm], bardzo duży [rozstaw >2000 mm]),

Tabela 41

Opis materiału skalnego pod względem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (PN-EN ISO 14689:2018-05)

Termin	Oznaczanie w terenie	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Rc [MPa]
Skrajnie słaba	można zarysować paznokciem, okruchy skały wielkości żwiru, rozpada się pomiędzy palcami	0,6–1
Bardzo słaba	można zarysować paznokciem, okruchy skały rozpadają się pod wpływem nacisku dłoni, rozpadają się po uderzeniu końcem młotka geologicznego, daje się strugać nożem	1–5
Słaba	cienkie okruchy, narożniki lub krawędzie próbek skały można odłamać pod naciskiem dłoni, można z trudem strugać nożem, pod wpływem pojedynczego silnego uderzenia końcem młotka geologicznego tworzą się płytkie wgniecenia	5–12,5
Umiarkowanie słaba	cienkie próbki, narożniki lub krawędzie próbek skał można odłamać pod silnym naciskiem dłoni, można z trudem zarysować nożem, próbka skały trzymana w ręku pęka pod wpływem pojedynczego silnego uderzenia młotkiem geologicznym	12,5–25
Średnio mocna	nie można zadrapać lub strugać nożem, próbka skały położona na twardej powierzchni pęka pod wpływem pojedynczego silnego uderzenia młotkiem geologicznym	25–50
Mocna	próbka skały pęka pod wpływem więcej niż jednego uderzenia młotkiem geologicznym	50–100
Bardzo mocna	próbka skały pęka pod wpływem wielu uderzeń młotkiem geologicznym	100–250
Skrajnie mocna	uderzenia młotkiem geologicznym powodują jedynie odpryskiwanie kawałków próbki	>250

- kształt bloków w trzech kierunkach (terminy: bloki wieloboczne, płytowe, pryzmatyczne, równoboczne, romboidalne, słupowe) opisany ilościowo przez:
  * długość ściany bloków skalnych (terminy: bardzo mała [<60 mm], mała [60–200 mm], średnia [200–600 mm], duża [600–2000 mm], bardzo duża [>2000 mm]),
  * objętość bloków skalnych (terminologia: bardzo mała [<1 dm^3], mała [1–30 dm^3], średnia [0,03–1,00 m^3], duża [1–30 m^3], bardzo duża [>30 m^3]),
  * objętościowy wskaźnik spękań J_v, czyli liczba spękań w jednostce objętości (terminy: skrajnie niski [<0,3], bardzo niski [0,3–1,0], niski [1–3], średnio wysoki [3–10], wysoki [10–30], bardzo wysoki [30–100], skrajnie wysoki [>100]);
- powtarzalność i zasięg nieciągłości,
- szorstkość powierzchni nieciągłości (terminy: dokładność w małej skali [kilku milimetrów] – bruzdkowa, gładka, szorstka; dokładność w średniej skali [kilku centymetrów] – płaska, falista, schodkowa; dokładność w dużej skali [kilku metrów] – prosta, zakrzywiona, falista),
- rozwarcie powierzchni nieciągłości (terminy: bardzo zwarte [<0,1 mm], zwarte [0,10–0,25 mm], częściowo otwarte [0,2–0,5 mm], otwarte [0,5–2,5 mm], umiarkowanie szerokie (2,5–10,0 mm], szerokie [10–100 mm], bardzo szerokie [100–1000 mm], skrajnie szerokie [>1000 mm]),
- wypełnienie szczelin (przestrzeni między nieciągłościami) – oznaczyć i opisać materiał wypełniający przestrzeń między powierzchniami nieciągłości (np.: grunt, minerały np. kwarc, epidot, chloryt, substancja ilasta lub rumosz skalny); w miarę potrzeb określić wytrzymałość na ścinanie oraz podatność na pęcznienie materiału wypełniającego,
- zawodnienie określane m.in. za pomocą prędkości przepływu (terminy: przepływ mały [0,05–0,50 l/s], średni [0,5-5,0 l/s], duży [>5 l/s]),
- liczba systemów spękań,

– zwietrzenie masywu skalnego, opisywane w sposób uproszczony na podstawie klasyfikacji stopnia zwietrzenia masywu skalnego (terminy: masyw skalny świeży, słabo zwietrzały, średnio zwietrzały, silnie zwietrzały, całkowicie zwietrzały, grunt rezydualny) lub na podstawie bardziej rozbudowanych klasyfikacji w celu szczegółowego opisu profilu wietrzeniowego.

Zgodnie z PN-EN ISO 14689:2018-05 (załącznik B) profil wietrzeniowy można klasyfikować i opisywać w pięciu podejściach:

– Podejście 1: Opis wietrzenia (obowiązkowy) zgodnie z punktem 5.4 i punktem 6.5 normy PN-EN ISO 14689:2018-05;
– Podejście 2: Klasyfikacja materiałów jednorodnych;
– Podejście 3: Klasyfikacja materiałów heterogenicznych (niejednorodnych);
– Podejście 4: Klasyfikacja uwzględniająca materiał i cechy masywu;
– Podejście 5: Przypadki szczególne.

W przypadkach szczególnych, w związku z regionalnymi uwarunkowaniami, profil wietrzeniowy można klasyfikować i opisywać, stosując inne klasyfikacje np. podaną w tabeli 42.

Jeśli zwietrzelina wykazuje cechy gruntu, opis zwietrzeliny sporządza się jak dla gruntów naturalnych zgodnie z normą PN-EN ISO 14688-1:2018-05. Opis uzupełnia się opisem okruchów skał występujących w gruncie, stosując normę PN-EN ISO 14689:2018-05. Opis zwietrzeliny, oznaczanej jako grunt, powinien zawierać procentowy udział okruchów skał i wypełnienia pomiędzy okruchami skał np.: siCl(75%) + Co(25%). Jeśli zwietrzelina wykazuje cechy skały, opis zwietrzeliny wykonuje się na podstawie normy PN-EN ISO 14689:2018-05.

Przy określaniu cech zwietrzeliny istotna jest granica grunt/skała. W latach 80. Krajewski (1984) zaproponował, aby grunt od skały odróżniać na podstawie kryterium wytrzymałościowego i odporności na rozmakanie. Zgodnie z tym kryterium jako skałę należy traktować ośrodek geologiczny o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie Rc > 1,0 MPa i podatności na rozmakanie > 0,5 (Pinińska 2000c). Zgodnie z normą PN-B-02480:1986 grunt skalisty to grunt rodzimy lity lub spękany o nieprzesuniętych blokach (najmniejszy wymiar bloku >10 cm), którego próbki nie wykazują zmian objętości ani nie rozmakają pod działaniem wody destylowanej i mają wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Rc > 0,2 MPa. Aktualne wydania norm PN-EN ISO 14688-1:2018-05 i PN-EN ISO 14689:2018-05 definiują granicę grunt/skała jako (Majer i in., 2018; Pinińska, 2000b, c):

- skały nie można zdezintegrować w wodzie za pomocą dłoni; skała ma generalnie większą wytrzymałość niż grunt; skała charakteryzuje się wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie równą lub większą niż 600 kPa; w profilu wietrzeniowym obserwuje się więcej niż 50% okruchów skały i mniej niż 50% gruntu;
- grunt można zdezintegrować w wodzie za pomocą dłoni; grunt ma mniejszą wytrzymałość niż skała; grunt charakteryzuje się wytrzymałością na ścinanie w warunkach bez odpływu równą lub mniejszą niż 300 kPa; w profilu wietrzeniowym obserwuje się mniej niż 50% okruchów skały i więcej niż 50% gruntu.

Należy podkreślić, że granica grunt/skała ma charakter zwyczajowy, a nie formalny i zakres podziału waha się od 0,2 do 1,5 MPa w zależności od stosowanej normy (Pinińska, 2000c).

3.6.1.4. Klasyfikacje masywu skalnego

Zaleca się klasyfikować masyw skalny pod względem geologiczno-inżynierskim, wykorzystując wybrane metody oceny masywu skalnego. Głównym celem klasyfikacji jest podział masywów, na podstawie wybranej grupy parametrów, na jednorodne części charakteryzujące się określonymi właściwościami, ważnymi ze względu na cel klasyfikacji (Majer, i in., 2018).

Masywy skalne ocenia się na podstawie klasyfikacji opisanych w literaturze (Pinińska, 2001a, b, 2002; Tajduś i in., 2012; Majer i in., 2018; Wytyczne..., 2019; Majer, Sokołowska, 2021). Do często stosowanych klasyfikacji masywu skalnego należą:

- **klasyfikacja RQD** (ang. *Rock Quality Designation*) wg: Deere, Miller, 1966; Deere i in., 1967; Deere, 1989;
- **klasyfikacja RMR** (ang. *Rock Mass Rating*) wg Bieniawskiego, 1973, 1979, 1989;
- **klasyfikacja Q** (ang. *Rock Mass Quality*) wg: Barton i in., 1974; Barton, 1999;
- **klasyfikacja GSI** (ang. *Geological Strength Index*) wg: Hoek, Brown, 1997; Hoek, 1999; Marinos, Hoek, 2000; Marinos i in., 2007;
- **klasyfikacja KFG** (geofizyczna) wg Bestyńskiego, 1993, 1997.

Masywy skalne zaleca się klasyfikować na podstawie wskaźnika RQD oraz klasyfikacji RMR, a w miarę możliwości na podstawie innych klasyfikacji, zwłaszcza wieloparametrycznych (np. Q, KFG).

Klasyfikacja RQD jest klasyfikacją jednoparametryczną, opartą na analizie podzielności rdzenia wiertniczego, który wskazuje na stopień spękania masywu skalnego. Wskaźnik RQD wyznacza się z zależności (PN-EN 14689; Deere, Miller, 1966; Deere i in., 1967; Deere, 1989):

$$RQD = \frac{\sum L_k}{L} \cdot 100$$

gdzie:

RQD – wskaźnik spękania masywu skalnego (syn. wskaźnik podzielności rdzenia wiertniczego) [%],

$\sum L_k$ – suma długości wszystkich kawałków rdzenia wiertniczego pomiędzy naturalnymi spękaniami, przy czym długość każdego kawałka rdzenia, mierzona wzdłuż osi rdzenia, musi być dłuższa od podwójnej średnicy rdzenia (Deere, 1968 za Deere, 1989) [m],

L – całkowita długość rdzenia wiertniczego (rdzeniowanego otworu) [m].

W zależności od stopnia spękania masywu, określonego wartością RQD, Deere wydzielił pięć klas oceny masywu skalnego (tab. 43).

Wskaźnik RQD jest wykorzystywany jako jeden z podstawowych parametrów w powszechnie stosowanych wieloparametrycznych klasyfikacjach oceny masywu skalnego (np. RMR i Q).

Klasyfikacja RMR to pierwsza klasyfikacja wieloparametryczna, powszechnie stosowana w ocenie masywu skalnego. Klasyfikacja ta jest oparta na sześciu podstawowych parametrach klasyfikacyjnych, którym przyporządkowano wartości liczbowe uwzględniające ilościowy wpływ każdego z nich na końcową wartość wskaźnika jakości masywu skalnego RMR (Bieniawski, 1973, 1979, 1989). Parametrami klasyfikacyjnymi systemu RMR są:

- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Rc;
- wskaźnik spękania masywu skalnego RQD;
- średnia odległość między nieciągłościami;
- charakterystyka powierzchni nieciągłości;
- stopień zawodnienia masywu skalnego;
- przestrzenna orientacja nieciągłości w stosunku do kierunku drążenia tunelu.

Wartość wskaźnika RMR jest sumą wartości liczbowych wymienionych parametrów klasyfikacyjnych (tab. 44).

W zależności od wartości RMR, masyw skalny dzieli się na pięć klas (tab. 45). Maksymalna wartość RMR wynosi 100.

Tabela 42

Strefy profilu wietrzeniowego wraz z opisem i kryteriami wydzielania (Majer i in., 2018; PN-EN ISO 14689:2018-05)

Granica skała/grunt	Numer strefy Nazwa strefy Stopień zwietrzenia RW* [%] Współczynnik redukcji wytrzymałości WRW** [–] Procentowy udział gruntu i/lub skały	Kryteria wydzielania warstw w profilu wietrzeniowym
Grunt	strefa VI grunt rezydualny RW = 100% WRW 0,001–0,005 100 % gruntu	skała w wyniku wietrzenia uległa przekształceniu w grunt, struktura i tekstura uległa zniszczeniu nastąpiły duże zmiany w objętości, grunt nie uległ przemieszczeniu, obserwuje się humus i korzenie, nastąpiły bardzo duże zmiany w objętości, próbka gruntu rozmaka pod wpływem wody, brak okruchów skały
Grunt	strefa V skała bardzo silnie zwietrzała RW>75% WRW 0,005–0,01 100% gruntu	skała w wyniku wietrzenia uległa rozkładowi i rozpadowi lub przekształceniu w grunt, struktura i tekstura nie uległy zniszczeniu, nastąpiły duże zmiany w objętości, próbka gruntu rozmaka pod wpływem wody, obserwuje się 25% okruchów skały i 75% gruntu, okruchy skały są zaokrąglone
Grunt / Skała	strefa IV skała silnie zwietrzała RW = 35–75% WRW 0,01–0,05 > 50% gruntu, < 50% skały	ponad połowa skały uległa rozkładowi lub rozpadowi w grunt, fragmenty świeżej skały macierzystej nie występują w sposób ciągły, próbka gruntu nie rozmaka pod wpływem wody, obserwuje się mniej niż 50% okruchów skały i więcej niż 50% gruntu, okruchy skały są lekko zaokrąglone, podłoże budowlane daje się rozkopać za pomocą szpadla lub młotka
	strefa III skała umiarkowanie zwietrzała RW = 10–35% WRW 0,05–0,25 < 50% gruntu, > 50% skały	mniej niż połowa skały uległa rozkładowi lub rozpadowi w grunt, obserwuje się więcej niż 50% okruchów skały i mniej niż 50% gruntu, okruchy skały są ostrokrawędziste, fragmenty świeżej skały macierzystej występują w sposób ciągły, podłoże budowlane nie daje się rozkopać za pomocą szpadla lub młotka
Skała	strefa II skała słabo zwietrzała RW = 0–10% WRW 0,25–1,0 100% skały	przebarwienia lub całkowite odbarwienie skały oraz powierzchni nieciągłości, wskazuje na rozpoczęcie procesów wietrzenia, grunt jest praktycznie niewidoczny
Skała	strefa I skała macierzysta RW = 0% 100% skały	możliwe przebarwienia powierzchni nieciągłości, brak widocznych śladów wietrzenia, całkowity brak gruntu

* RW – stopień zwietrzenia określony jako procentowy udział gruntu rezydualnego do okruchów skały macierzystej

** WRW – współczynnik redukcji wytrzymałości wyrażony jako stosunek wytrzymałości na ściskanie skały zwietrzałej do wytrzymałości skały niezwietrzałej (WRW = Rc zwietrzeliny / Rc skały)

Na podstawie wskaźnika RMR i zależności korelacyjnych możliwe jest również oszacowanie wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych oraz innych parametrów wykorzystywanych do projektowania i drążenia tuneli (Tajduś i in., 2012).

Tabela 43

Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na wskaźnik spękania masywu skalnego RQD (Deere, Miller, 1966; Deere i in., 1967; Deere, 1989)

Termin opisujący masyw skalny	Wskaźnik RQD [%]
Bardzo słaby	<25
Słaby	25–50
Średni	50–75
Dobry	75–90
Doskonały	90–100

Bieniawski (1989) na podstawie opracowanej klasyfikacji zaproponował wytyczne doboru obudowy wstępnej wyrobisk podziemnych drążonych tradycyjnymi metodami o szerokości nieprzekraczającej 10 m i o głębokości do 1000 m p.p.t. (Tajduś i in., 2012).

Klasyfikacja Q została opracowana na podstawie doświadczeń w drążeniu wyrobisk górniczych i tuneli w granitach i gnejsach. Masyw skalny ocenia się na podstawie wartości wskaźnika Q, który jest określany na podstawie sześciu parametrów z wzoru (Barton i in., 1974; Barton, 1999):

$$Q = \frac{\mathrm{RQD}}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{\mathrm{SRF}}$$

gdzie:

Q – wskaźnik jakości masywu skalnego Q [–],

RQD – wskaźnik spękania masywu skalnego (syn. wskaźnik podzielności rdzenia wiertniczego) [%],

Tabela 44

Klasyfikacja Bieniawskiego – RMR (Tajduś i in., 2012; Wytyczne..., 2019)

A. Klasyfikacja parametrów i wartości znamionowe									
Parametr			Zakres wartości						
1	Wytrzymałość nienaruszonego materiału skalnego	punktowa wytrzymałość	>10 MPa	4–10 MPa	2–4 MPa	1–2 MPa	preferuje się wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie		
		jednoosiowa wytrzymałość na ściskanie	>250 MPa	100–200 MPa	50–100 MPa	25–50 MPa	5–25 MPa	1–5 MPa	<1 MPa
	Wartość znamionowa		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90–100%	75–90%	50–75%	25–50%	<25%		
	Wartość znamionowa		20	17	13	8	3		
3	Odległość nieciągłości		>2 m	0,6–2,0 m	200–600 mm	60–200 mm	<60 mm		
	Wartość znamionowa		20	15	10	8	5		
4	Charakterystyka nieciągłości		bardzo chropowate powierzchnie; brak ciągłości; brak rozwarcia; niezwietrzałe ściany	delikatnie chropowate powierzchnie; rozwartość <1 mm; wygładzone, zwietrzałe ściany	delikatnie chropowate powierzchnie; rozwartość <1 mm; silnie zwietrzałe ściany	wypolerowane, materiał wypełniający <5 mm grubości; rozwartość 1–5 mm; ciągłe	miękki materiał wypełniający >5 mm grubości; rozwartość >5 mm; ciągłe		
	Wartość znamionowa		30	25	20	10	0		
5	Zawodnienie	dopływ na 10 m tunelu (l/min)	brak	<10	10–25	25–125	>125		
		generalne warunki	sucho	wilgotno	mokro	wykroplenia	dopływ		
	Wartość znamionowa		15	10	7	4	0		
B. Ustalenie dopasowania dla orientacji nieciągłości (patrz C)									
Rozciągłość i orientacja upadu			bardzo korzystny	korzystny	średni	niekorzystny	bardzo niekorzystny		
Wartość znamionowa		tunele i wyrobiska górnicze	0	−2	−5	−10	−12		
		fundamenty	0	−2	−7	−15	−25		
		zbocza	0	−5	−25	−50	−60		

C. Efekt drążenia przy uwzględnieniu upadu i rozciągłości w stosunku do orientacji osi tunelu			
Rozciągłość prostopadła do osi tunelu		Rozciągłość równoległa do osi tunelu	
Drążenie z upadem: upad 45−90°	Drążenie z upadem: upad 20−45°	Upad 45−90°	Upad 20−45°
bardzo korzystne	korzystne	bardzo korzystne	średnia
Drążenie po wzniosie: upad 45−90°	Drążenie po wzniosie: upad 20−45°	Upad 0−20° – niezależnie od rozciągłości	
średnie	niekorzystne	średni	

J_n – wskaźnik liczby systemów spękań [–],
J_r – wskaźnik chropowatości szczelin [–],
J_a – wskaźnik przeobrażenia spękań [–],
J_w – wskaźnik zawodnienia [–],
SRF – wskaźnik stanu naprężeń masywu skalnego [–].

Opis parametrów i przyporządkowanie im wartości punktów do klasyfikacji Q odczytuje się z tabel 46–51 (na podstawie: *Q-system Quick Reference*, 2015, www.ngi.no za Tajduś i in., 2012; Wytyczne..., 2019). W zależności od uzyskanej wartości Q masyw skalny dzieli się na 9 klas (tab. 52).

Na podstawie wartości Q możliwe jest określenie parametrów odkształceniowych masywu skalnego (np. Singh, 1997 i Barton, 2002 za Tajduś i in., 2012). Klasyfikacja Q jest stosowana wymiennie z klasyfikacją RMR, w związku z tym opracowano wiele wzorów korelacyjnych pomiędzy tymi klasyfikacjami (Tajduś i in., 2012).

Tabela 45

Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na wskaźnik RMR (Bieniawski, 1973, 1979, 1989)

Klasa masywu skalnego (nr grupy)	Termin opisujący masyw skalny (ocena)	Wskaźnik RMR [pkt] (sumaryczna wartość znamionowa)
V	bardzo słaby	0–20
IV	słaby	21–40
III	średni	41–60
II	mocny	61–80
I	bardzo mocny	81–100

Tabela 46

Podzielność rdzenia wiertniczego w klasyfikacji Q

Oznaczenie podzielności rdzenia wiertniczego RQD		Wskaźnik RQD [%]
A. Bardzo słaba	(>27 spękań na m^3)	0–25
B. Słaba	(20–27 spękań na m^3)	25–50
C. Średnia	(13–19 spękań na m^3)	50–75
D. Dobra	(8–12 spękań na m^3)	75–90
E. Doskonała	(0–7 spękań na m^3)	90–100

UWAGA: i) jeżeli RQD ≤10%, to do obliczeń Q należy przyjąć wartość RQD = 10; ii) RQD wystarczy podawać z dokładnością do 5 (np. 85 zamiast 83)

Tabela 47

Ocena liczby sieci spękań w klasyfikacji Q

Wskaźnik liczby systemów spękań J_n	Wartość J_n [–]
A. Lita skała, brak lub niewiele spękań	0,5–1,0
B. Jedna sieć spękań	2
C. Jedna sieć spękań i losowe	3
D. Dwie sieci spękań	4
E. Dwie sieci spękań i losowe	6
F. Trzy sieci spękań	9
G. Trzy sieci spękań i losowe	12
H. Cztery lub więcej sieci spękań, losowe, mocno spękane, wyodrębnione bloki skalne (kostki cukru)	15
I. Pokruszona skała, zwietrzelina	20

UWAGA: i) dla skrzyżowań zastosuj: $J_n \times 3$; ii) dla portali tuneli zastosuj $J_n \times 2$

Tabela 48

Ocena chropowatości szczelin w klasyfikacji Q

Wskaźnik chropowatości spękań J_r	Wartość J_r [–]
a) kontakt ścianek spękania, oraz **b) kontakt ścianek szczeliny przed 10 cm ścięciem**	
A. Nieciągłe spękania	4
B. Szorstkie i nieregularne, pofałdowane	3
C. Wygładzone, pofałdowane	2
D. Wypolerowane, pofałdowane	1,5
E. Szorstkie, nieregularne, płaskie	1,5
F. Wygładzone, płaskie	1
G. Wypolerowane, płaskie	0,5

UWAGA: i) opis od B do G odpowiada małej i średniej wielkości nieciągłości

c) brak kontaktu pomiędzy ściankami szczeliny podczas ścięcia	
H. Strefy zawierające minerały ilaste o miąższości, która uniemożliwia kontakt ścianek	1

UWAGA: ii) dolicz 1,0, jeżeli średnia odległość spękań znaczącej sieci spękań jest większa niż 3 m (w zależności od wymiarów tunelu); iii) J_r = 0,5 dla płaskich wypolerowanych spękań charakteryzujących się liniowością, która przebiega zgodnie z kierunkiem prawdopodobnego poślizgu

Tabela 49

Ocena wskaźnika przeobrażenia spękań w klasyfikacji Q

Wskaźnik przeobrażenia spękań	φ_r [°] (wartości orientacyjne)	Wartość J_a [-]
a) ścianki w kontakcie (brak mineralnych wypełnień, tylko powłoka)		
A. Zrośnięte, twarde, bez osłabienia, nieprzepuszczalny materiał wypełniający	–	0,75
B. Niezmienione ścianki szczelin, tylko powierzchniowe odbarwienie	25–35	1,0
C. Lekko przeobrażone ścianki spękań. Nieosłabiona mineralna powłoka, ziarna piasku, rozdrobnione skały niezawierające iłu itp.	25–30	2,0
D. Pylasto- lub piaskowo-ilasta powłoka, mała ilość frakcji ilastej (bez osłabienia)	20–25	3,0
E. Osłabione lub zawierające powłokę z minerałów ilastych np. kaolinitów, miki. Także chloryty, talk, gips i grafit. Małe ilości pęczniejącego iłu	8–16	4,0
b) kontakt ścianek przed 10 cm ścięciem (cienkie wypełnienia mineralne)		
F. Ziarna piasku, brak iłu, rozdrobniona skała itp.	25–30	4,0
G. Silnie prekonsolidowane, bez osłabienia wypełnienie ilaste (ciągłe, ale <5 mm)	16–24	6,0
H. Średnio lub mało prekonsolidowane, osłabione wypełnienia ilaste (ciągłe, ale <5 mm)	12–16	8,0
J. Wypełnienia pęczniejącym iłem, np. montmorylonit (ciągła, ale <5 mm). Wielkość J_a zależy od procentowego udziału cząstek pęczniejącego iłu	6–12	8,0–12,0
c) brak kontaktu ścian podczas ścięcia (grube wypełnienia mineralne)		
K. Strefy lub warstwy rozdrobnionej lub pokruszonej skały. Mocno prekonsolidowane	16–24	6
L. Strefy lub warstwy iłu, rozdrobniona lub pokruszona skała. Średnio lub mało prekonsolidowane lub wypełnienia z osłabieniem	12–16	8
M. Strefy lub warstwy iłu, rozdrobniona lub pokruszona skała. Iły pęczniejące. J_a zależy od procentowego udziału pęczniejących minerałów ilastych	6–12	8–12
N. Ciągłe strefy o dużej miąższości lub warstwy iłów. Mocno prekonsolidowane	12–16	10
O. Ciągłe strefy o dużej miąższości lub warstwy iłów. Średnio lub mało prekonsolidowane	12–16	13
P. Grube, ciągłe strefy lub warstwy z iłem. Iły pęczniejące. J_a zależy od procentowego udziału pęczniejących minerałów ilastych	6–12	13,0–20,0

Tabela 50

Ocena zawodnienia w klasyfikacji Q

Wskaźnik zawodnienia J_w	Wartość J_w [–]
A. Suche warunki lub mniejszy dopływ (wilgotno, kilka kropel)	1,00
B. Średni dopływ, lokalnie wymycia materiału wypełniającego spękania (kilka kropel/„deszcz”)	0,66
C. Strumieniowy dopływ lub duże ciśnienie w skałach zwięzłych ze spękaniami bez wypełnienia	0,50
D. Duży dopływ lub duże ciśnienie, znaczne wymycia materiału wypełniającego spękania	0,33
E. Wyjątkowo silny dopływ lub ciśnienie zanikające w czasie. Powoduje wymycia materiału a czasami kawernowanie	0,20–0,10
F. Wyjątkowo silny dopływ wody lub ciśnienie bez widocznego zanikania w czasie. Powoduje wymycia materiału a czasami kawernowanie	0,10–0,05

UWAGA: i) wskaźniki zawodnienia od C do F są zgrubnie oszacowane. Zwiększ J_w, jeżeli masyw skalny jest z drenażem lub zastosowano iniekcje; ii) specjalne problemy na skutek formacji lodu nie są rozważone

Tabela 51

Ocena stanu naprężenia masywu skalnego w otoczeniu wyrobisk w klasyfikacji Q

Wskaźnik SRF	SRF [–]
a. Strefy słabe, przecinające wyrobisko, co może spowodować rozluźnienie się stref osłabienia	
A. Wiele występujących stref osłabienia, zawierające na krótkich odcinkach wtrącenia iłu lub chemicznie rozdrobnionej skały, bardzo luźne otaczające skały (każda głębokość), lub długie odcinki w niezwięzłej (słabej) skale (każda głębokość)	10,0
B. Wiele stref ścięcia w skale zwięzłej (brak iłu), rozluzowane skały otaczające (każda głębokość)	7,5
C. Pojedyncza strefa osłabienia z lub bez iłu lub chemicznie rozdrobnionej skały (głębokość drążenia ≤50 m)	5,0
D. Rozluzowane, otwarte spękania, mocno spękane lub w kształcie kostek cukru, każda głębokość	5,0
E. Pojedyncza strefa osłabienia zawierająca ił lub chemicznie rozdrobnioną skałę (głębokość drążenia >50 m)	2,5

UWAGA: i) zredukuj SRF o 25–50% , ale tylko kiedy znacząca strefa ścięcia nie przecina tunelu

b. Masyw skalny zwięzły, problemy związane z naprężeniami	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
F. Niskie naprężenia, blisko powierzchni terenu, otwarte spękania	>200	<0,01	2,5
G. Średnie koncentracje naprężeń, korzystne warunki naprężeniowe	200–10	0,01–0,3	1,0
H. Duże koncentracje naprężeń, bardzo wąskie wyrobiska. Zazwyczaj korzystne dla warunków stateczności. Mogą być niekorzystne dla stateczności w zależności od orientacji naprężeń w stosunku do spękań/stref słabych*	10–5	0,3–0,4	0,5–2,0 2–5*
J. Umiarkowane odspajanie się lub „łuszczenie" po >1h w masywnej skale	5-3	0,5 -0,65	5–50
K. Odspajanie się i/lub tąpnięcia w ciągu kilku minut w masywnej skale	3–2	0,65–1	50–200
L. Silne tąpnięcia oraz natychmiastowe deformacji dynamiczne w masywnej skale	<2	>1	200–400

UWAGA: ii) dla mocno anizotropowego pola naprężeń pierwotnych (jeżeli jest zmierzone): kiedy $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, zredukuj σ_c do 0,75 σ_c. Jeżeli $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, zredukuj σ_c do 0,5 σ_c, gdzie σ_c = wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, σ_1 i σ_3 są to naprężenia główne (największe i najmniejsze), a σ_θ = wytrzymałość na rozciąganie (oszacowana na podstawie teorii sprężystości); iii) w przypadku, gdy strop tunelu znajduje się na głębokości mniejszej od jego szerokości proponuje się zwiększyć SRF z wartości 2,5 do 5,0 (patrz: F)

c. Masyw skalny skłonny do plastycznego płynięcia	σ_θ/σ_c	SRF
M. Skłonny do plastycznego płynięcia	1–5	5–10
N. Silnie skłonny do plastycznego płynięcia	>5	10–20

UWAGA: iv) oszacowanie warunków masywu skalnego z tendencją do plastycznego płynięcia musi być wykonane w odniesieniu do odpowiedniej literatury (np. Singh i in., 1992 i Bhasin, Grimstad, 1996 za Tajduś i in., 2012)

d. Masyw skalny pęczniejący, aktywnie chemicznie pęczniejący pod wpływem wody	
O. Łagodnie pęczniejący	5–10
P. Silnie pęczniejący	10–15

Tabela 52

Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na wskaźnik Q (Barton i in., 1974; Barton, 1999)

Klasa masywu skalnego	Termin opisujący masyw skalny (jakość masywu skalnego)	Wskaźnik Q [–]	Klasa masywu skalnego	Termin opisujący masyw skalny (jakość masywu skalnego)	Wskaźnik Q [–]
1	skrajnie słaby	0,001–0,01	6	dobry	10–40
2	wyjątkowo słaby	0,01–0,1	7	bardzo dobry	40–100
3	bardzo słaby	0,1–1	8	wyjątkowo dobry	100–400
4	słaby	1–4	9	skrajnie dobry	400–1000
5	średni	4–10			

Klasyfikacja GSI oparta jest na makroskopowym oznaczaniu właściwości masywu skalnego za pomocą wskaźnika GSI (Hoek, Brown, 1997). Wartość wskaźnika GSI jest odczytywana z diagramów opracowanych dla wybranych przypadków masywów skalnych na podstawie opisu litologii, struktury masywu i jakości powierzchni nieciągłości (np. tab. 53, 54 – dla fliszu). Wartość GSI powinna być podawana w przedziale wartości, a nie jako wartość punktowa. Celem klasyfikacji GSI było uproszczenie klasyfikacji RMR dla słabych masywów skalnych oraz dostarczenie danych do modelowania numerycznego (Wytyczne..., 2019). Uproszczenie polegało na powiązaniu struktury oraz jakości powierzchni spękań występujących w masywach skalnych z liczbową wartością wskaźnika GSI prezentowanego na diagramach (np. tab. 53, 54 – dla fliszu), którego wartość odpowiada sumie punktów uzyskanych dla pięciu podstawowych parametrów klasyfikacji RMR (tab. 44). Wskaźnik GSI można wykorzystywać do oszacowania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu skalnego przede wszystkim dla kryterium wytrzymałościowego Hoeka- Browna (Tajduś i in., 2012). Istnieją również korelacje umożliwiające na oszacowanie wartości GSI na podstawie wartości wskaźnika RMR lub Q (Hoek, Brown, 1997).

Klasyfikacja geofizyczna KFG jest to klasyfikacja fliszowego masywu skalnego, opracowana z wykorzystaniem dwóch parametrów geofizycznych: prędkości fali sejsmicznej podłużnej *Vp* oraz oporności elektrycznej ρ (Bestyński, 1993, 1997). Klasyfikację opracowano na podstawie doświadczeń krajowych zdobytych podczas realizacji inwestycji na obszarze masywu fliszowego (Bestyński i in., 1988, 1989; Bestyński, 1993, 1997; Bestyński, Thiel, 1999, 2007). Wieloletnie badania wykazały, że najbardziej efektywne w rozpoznaniu budowy geologicznej i określeniu właściwości geomechanicznych fliszu są metody sejsmiczne i elektrooporowe. Badania sejsmiczne umożliwiają zlokalizowanie i okonturowanie stref koncentracji spękań związanych z tektoniką, które charakteryzują się obniżonymi prędkościami fal sejsmicznych. Badania elektrooporowe pozwalają natomiast na określenie litologii w zakresie procentowego udziału piaskowców i łupków, opierając się na zróżnicowanych wartościach oporności elektrycznej (Bestyński, Thiel, 2007). Klasyfikacja została opracowana na podstawie korelacji prędkości fali podłużnej *Vp* i oporności elektrycznej pozornej ρ_a i dostosowana do klasyfikacji RMR. Klasyfikacja zakłada, że właściwości fliszowego masywu skalnego można ocenić na podstawie wskaźnika KFG opisanego za pomocą funkcji parametrów *Vp* i ρ_a. W wyniku aproksymacji wielomianami, autorzy[45] dla powierzchni drugiego stopnia określili zależność KFG = f (*Vp*, ρ_a), która ma postać (rys. 64):

$$KFG = 6{,}4 \cdot 10^{-5} \rho_a^{\,2} + 0{,}024 Vp + 2{,}84 \cdot 10^{5} \rho_a Vp - 3{,}33 \cdot 10^{-6} Vp^2 - 18{,}6$$

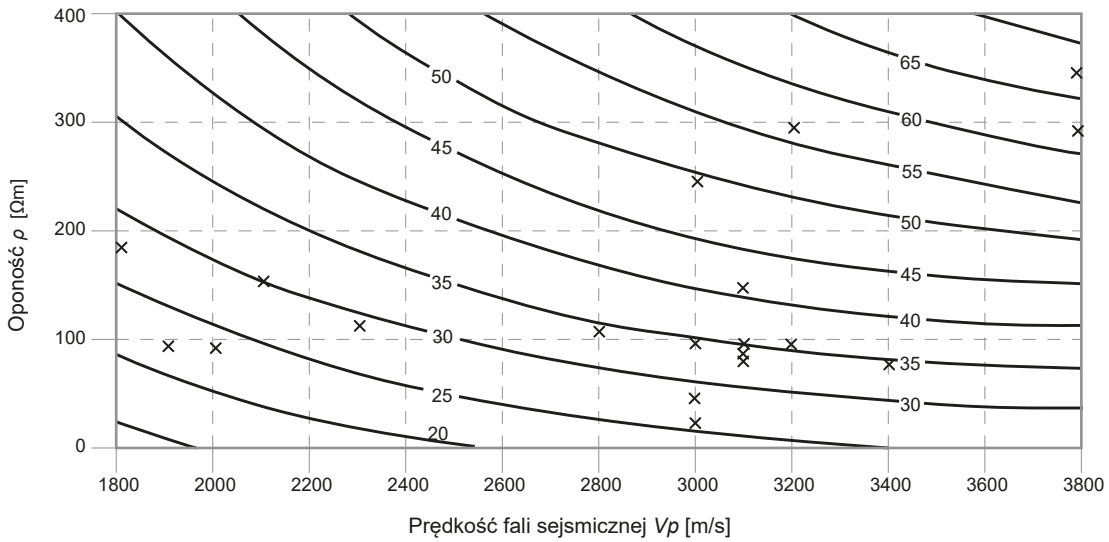
gdzie:

KFG – wskaźnik oceny fliszowego masywu skalnego [pkt],
ρ_a – oporność elektryczna pozorna [Ωm],
Vp – prędkość fali podłużnej [m/s].

W zależności od wartości wskaźnika KFG, masyw skalny podzielono na pięć klas (tab. 55), tak żeby odpowiadały klasyfikacji RMR (Bestyński, 1997).

Na podstawie wskaźnika KFG możliwe jest również określenie szacunkowych wartości statycznego modułu Younga E_{st} (Bestyński, 1997).

[45] Bestyński (1997) podał także zależność dla powierzchni trzeciego stopnia.



Rys. 64. Zależność KFG = f (*Vp*, ρ) dla powierzchni 2. stopnia (Bestyński, 1997)

Tabela 53

Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na wskaźnik GSI
(Hoek, Brown, 1997; Marinos, Hoek, 2000; Tajduś i in., 2012)

GSI
(Geologiczny wskaźnik jakości)

Na podstawie opisu litologii, struktury i jakości powierzchni nieciągłości należy wybrać przeciętną wartość GSI. Wartość GSI zaleca się podawać w przedziale (wartość podawana w przedziale jest bardziej realistyczna niż podanie wartości punktowej). Należy zaznaczyć, że tabela nie dotyczy strukturalnie kontrolowanego zniszczenia. Słabe płaskie płaszczyzny strukturalne o niekorzystnej orientacji względem czoła wyrobiska będą dominować zachowanie się górotworu. Wytrzymałość na ścinanie powierzchni w skałach, które w wyniku zmian wilgoci są podatne na niszczenie, zostanie zmniejszona w obecności wody. Podczas pracy ze skałami w kategoriach średnia i bardzo słaba, w przypadku stwierdzenia wilgotnych warunków, można dokonać przesunięcia w prawo. Ciśnienie wody jest uwzględniane za pomocą analizy naprężeń efektywnych

Struktura	Jakość powierzchni spękania	**Bardzo dobra** Bardzo szorstka, świeża, nie wietrzała powierzchnia	**Dobra** Szorstka, lekko zwietrzała, zażelaziona powierzchnia	**Średnia** Gładka, średnio zwietrzała, przeobrażona powierzchnia	**Słaba** Powierzchnia wypolerowana, silnie zwietrzała, z powłoką lub wypełnieniem zwartym lub z materiałem ostrokrawędzistym	**Bardzo słaba** Powierzchnia wypolerowana, silnie zwietrzała, z miękką ilastą powłoką lub wypełnieniem
		Spadek jakości powierzchni →				
Nienaruszona/Masywna Masyw skalny lity lub z kilkoma sporadycznie występującymi nieciągłościami	Spadek wzajemnego klinowania się kawałków skały ↓	90			N/A	N/A
Blokowa Dobrze zaklinowane bloki skalne, masyw skalny niezniszczony, składający się z sześciennych bloków, uformowanych przez nie więcej niż trzy przecinające się sieci nieciągłości		80	70			
Bardzo blokowa Zklinowane bloki skalne, częściowo naruszony masyw skalny z wielościennymi, ostrokrawędzistymi blokami utworzonymi przez cztery lub więcej sieci nieciągłości			60	50		
Blokowa/Zaburzona/Warstwowana Pofałdowany, z kanciastymi blokami, utworzonymi przez wiele przecinającym się sieci nieciągłości. Występuje warstwowanie lub złupkowacenie				40	30	
Rozdrobniona Słabo zaklinowane bloki skalne, masyw skalny mocno pokruszony, z mieszanką ostrokrawędzistych i owalnych okruchów skalnych					20	
Laminowana/Zniszczona brak zaklinowania związany z niewielkimi odstępami złupkowacenia lub powierzchni o charakterze ścięć		N/A	N/A			10

Tabela 54

Klasyfikacja masywu skalnego ze względu na wskaźnik GSI dla fliszu (Hoek, Brown, 1997; Tajduś i in., 2012)

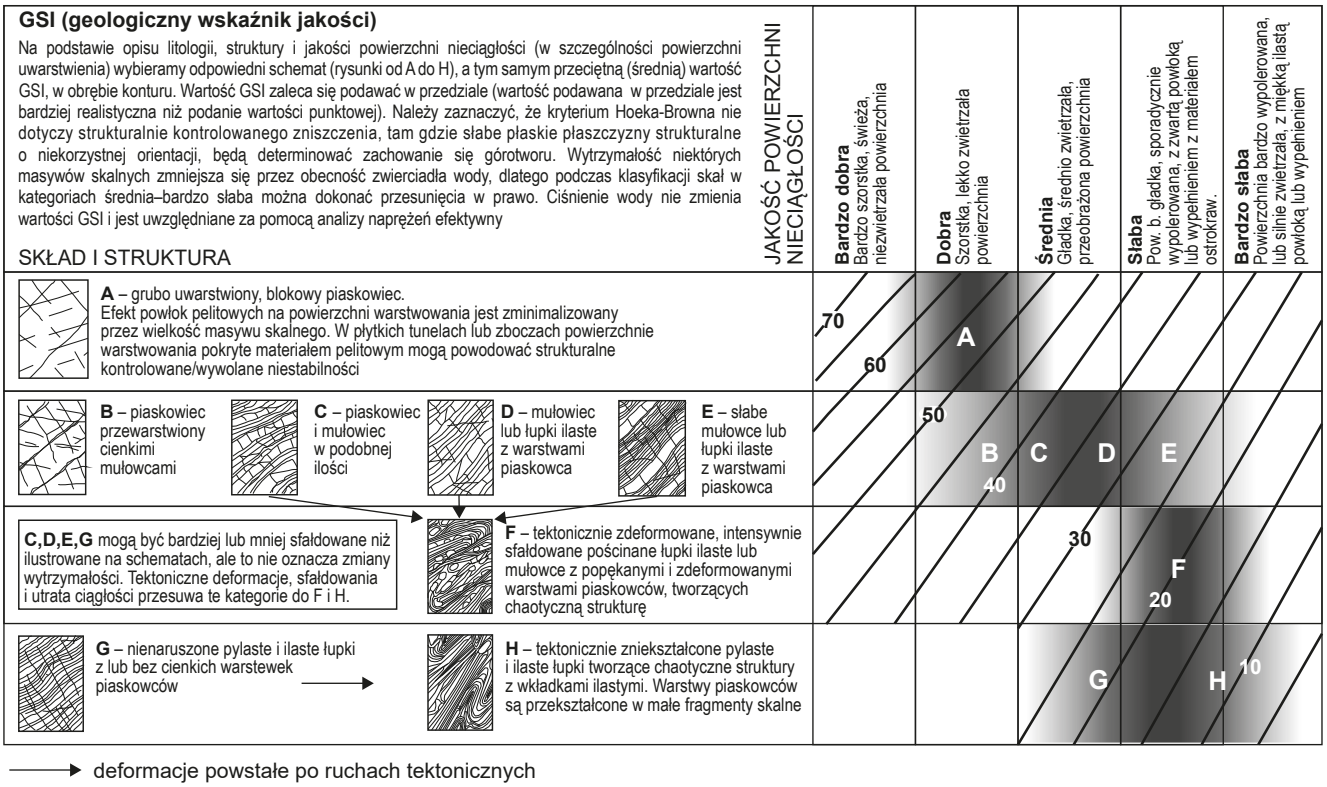


Tabela 55

Klasyfikacja masywu skalnego wg wskaźnika KFG (Bestyński, 1997)

Klasa geotechniczna masywu skalnego	Wskaźnik KFG [pkt]
Vb Va	0–14 15–20
IV	21–40
III	41–60
II	61–80
I	81–100

3.6.2. Badania petrofizyczne

Badania petrofizyczne próbek skał na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania w zależności od rodzaju skały podzielono na podstawie norm i literatury[46] na:

– badania chemiczne, które obejmują:
  - badania petrograficzne,
  - badania mineralogiczne,
  - badania zawartości węglanów;

– badania fizyczne obejmujące:
  - badania uziarnienia,
  - badania wilgotności,
  - badania gęstości,
  - badania porowatości,
  - badania nasiąkliwości,
  - badania rozmakalności,
  - badania termiczne,
  - badania przepuszczalności.

W zależności od potrzeb można zaprojektować i wykonać inne badania fizyczne, np. badania: mrozoodporności, rozmywalności, rozpuszczalności czy elektrooporowe.

Na podstawie wyników badań petrofizycznych określa się właściwości i parametry chemiczne oraz fizyczne próbek skał (patrz: tab. 61 str. 202), które opisują istotne cechy skał dotyczące ich właściwości uszczelniających lub zbiornikowych.

[46] PN-EN 1997-2:2009; prEN 1997-2:2022 (E); instrukcje ISRM (Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2014); Hobler, 1977; Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b; Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013; Wytyczne..., 2019.

3.6.2.1. Badania chemiczne

3.6.2.1.1. Badania petrograficzne

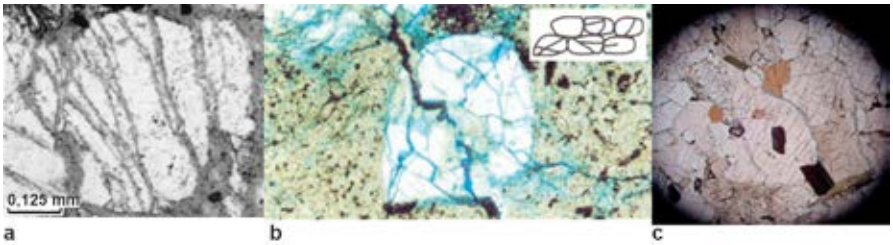
W celu ustalenia korelacji oraz odpowiedniego rozpoznania historii geologicznej badanych skał należy wykonać szczegółowe badania petrograficzne, obejmujące analizę płytek cienkich z wykorzystaniem mikroskopu petrograficznego ze stolikiem obrotowym, z możliwością wykonywania analizy w świetle spolaryzowanym.

Dobrze przeprowadzona analiza petrograficzna pozwala na zrozumienie właściwości fizycznych badanych skał, takich jak porowatość i przepuszczalność. Tego rodzaju badania należy przeprowadzać przed badaniami geomechanicznymi oraz po ich wykonaniu w celu ustalenia reakcji struktury ośrodka na dane warunki stanu naprężenia i temperatury, którym próbka była poddana podczas badań geomechanicznych. Ustalenie charakteru niejednorodności struktury skały jest ważnym elementem poprawnej interpretacji zakresu sprężystego zachowania materiału skalnego, przebiegu procesu kruchego pękania oraz stanu kataklastycznego pełzania (rozdz. 3.6.3.2.5). Różnice w charakterze inicjacji procesów pękania mają wpływ na mechanizm propagacji szczelin w makroskali i charakter szorstkości powierzchni szczeliny. W skałach zbudowanych z ziaren wytrzymałych, kontaktujących bezpośrednio ze sobą pod obciążeniem dochodzi szybko do ich kruchego pękania. Lokalne niszczenie struktury materiału jest zatem intragranularne o charakterze rozciągania, bez widocznych objawów zewnętrznych i materiał w znacznym przedziale naprężenia wykazuje cechy quasi-sprężyste. Dochodzi wtedy do koncentracji naprężeń na kontakcie „ziarno/ziarno", co skutkuje intragranularnym pękaniem rozdzielczym poszczególnych ziaren (Olsson, Peng, 1976; Coundal, Fairhurst, 1986; Pinińska, 1992, 2008). Struktura skały staje się wewnętrznie niestabilna (rys. 65) (Pinińska, 2017). Totalne zniszczenie struktury, po połączeniu się krytycznej liczby defektów, ma charakter gwałtowny. Jeżeli ziarna skalne nie stykają się ze sobą, lecz rozdziela je słabo wytrzymałe spoiwo, procesy pękania występują w spoiwie i mają charakter intergranularny. Procesy te zachodzą powoli i przy widocznych deformacjach struktury o charakterze ścinania.

W słabo zdiagenezowanych skałach węglanowych lub osadowych o spoiwie węglanowym i ziarnach losowo rozproszonych pękanie ma charakter intergranularny na kontakcie ziarno/spoiwo. Jest zdominowane przez procesy ścinania, w których szorstkość powierzchni pękania, kruszenie i klinowanie nieforemnych fragmentów skały w szczelinie opóźnia finalną destrukcję (rys. 66) (Łukaszewski, 1996, 2013; Pinińska, 2017; Poszytek i in., 2020).

Przebieg analizy petrograficznej przedstawiono w normach: PN-EN 932-3 oraz PN-EN 12407. Zawierają one ogólne uwagi na temat analizy petrograficznej oraz definicje głównych typów litologicznych. W praktyce jest wymagane zastosowanie bardziej szczegółowego podejścia.

Jednym z głównym zadań opisu petrograficznego jest statystyczne opracowanie składu mineralnego w ujęciu planimetrycznym (ang. *point counting*). Należy pamiętać, że żadnej z niżej wymienionych metod nie można przekonwertować na udział objętościowy lub wagowy. Identyfikacji minerałów dokonuje się w kolejnych zaplanowanych punktach, tworzących siatkę o oczkach najczęściej w kształcie kwadratów – metoda Glagoleva-Chayesa (Galehouse, 1971). Zalecenie do przeprowadzenia analizy zawarto w normach



Rys. 65. Skały krystaliczne, ogniska pękania intragranularnego

a – spękane rozdzielczo ziarno kwarcu, **b** – transgranularny rozwój szczeliny, **c** – struktura spękana wewnętrznie bez przemieszczeń (Pinińska, 2017)

Rys. 66. Skały węglanowe oraz o spoiwie węglanowym, ogniska pękania intergranularnego

a – wapienie organiczne, **b** – wapienie z detrytusem organicznym, **c** – piaskowiec o spoiwie węglanowym (Pinińska, 2017)

ASTM (ASTM D2799, ASTM E562) (Ziemianin, 2021). Warto podkreślić, że tak przeprowadzona analiza planimetryczna jest czuła na wielkość ziarna, co zaburza rzeczywisty obraz proporcji poszczególnych minerałów (Garzanti, Andò, 2019). Rozstaw siatki pomiarowej należy dobrać tak, żeby poszczególna ziarna nie były identyfikowane więcej niż raz.

Innym sposobem opracowania składu mineralnego jest technika *Ribbon method* (Galehouse, 1971), polegająca na losowym wyborze pasm w obrębie szkiełka mikroskopowego. Ziarna w obrębie pasm są liczone podczas manewrowania preparatem przez stację mechaniczną. Szerokość pasm można wygodnie zmierzyć za pomocą okularu mikrometrycznego. W tej technice jest eliminowany wpływ wielkości ziarna na wynik analizy. W trakcie badań planimetrycznych warto posiłkować się programami umożliwiającymi szybką analizę obrazu np. JMicrovision.

Mikroskopowy opis płytek cienkich powinien zawierać skład mineralny, charakterystykę tekstury, uziarnienia, kształtu kryształów, orientacji ziaren, stopnia obtoczenia oraz stopnia zwietrzenia komponentów mineralnych (Krumbein, 1941; Pettijohn, 1949; Powers, 1953, Andò i in., 2012). Należy określić typ spoiwa, nazwać typy warstwowań, określić stopień bioturbacji oraz możliwie dokładnie odwzorować historię diagenezy. Analiza obrazu w płytkach cienkich musi zawierać ocenę występujących w próbce niejednorodności struktury materiału skalnego oraz stanu jej deformacji w stanie naturalnym (wystąpienia mikrospękań wewnątrzziarnowych i międzyziarnowych, lokalne koncentracje defektów). W trakcie analizy mikroskopowej należy scharakteryzować przestrzeń porową. W celu ułatwienia identyfikacji porów można zastosować niebieską żywicę. Pomocnym odczynnikiem do identyfikacji węglanów jest alizaryna, która barwi węglany na czerwono.

3.6.2.1.2. Badania mineralogiczne

Identyfikacja minerałów jest podstawą badań petrograficznych. Do poprawnej identyfikacji należy w sposób szczegółowy określić cechy zewnętrzne i wewnętrzne kryształów, takie jak: barwa, rysa, twardość (skala Mohsa), połysk, przezroczystość, łupliwość i/lub przełam, spójność, ciężar właściwy, skupienie oraz właściwości: magnetyczne i elektryczne, radioaktywność, luminescencje i symetrię kryształów. Jednym z podstawowym narzędzi do określenia składu mineralnego są metody mikroskopii optycznej. Najczęściej wykorzystywanymi sprzętami są lupa optyczna, mikroskop stereoskopowy (lupa binokularowa) oraz mikroskop polaryzacyjny. Analiza składu mineralnego z wykorzystaniem światła spolaryzowanego jest podstawową procedurą w trakcie badań planimetrycznych. Za pomocą analizatora można określić następujące cechy fizyczne (w tym optyczne) faz mineralnych: wielkość ziarna, barwę, pleochroizm, współczynnik załamania światła (np. metoda smugi Beckego), a także stopień zanieczyszczenia kryształów przez różnego typu inkluzje. Przy skrzyżowanych nikolach w świetle równoległym oznaczamy dwójłomność i kąt znikania światła. W trakcie badań konoskopowych, silnie skupiających soczewkę, uzyskuje się efekty świetlne (figury interferencyjne) pozwalające stwierdzić ważne w identyfikacji minerałów cechy optyczne – w łatwy sposób możemy odróżnić minerały jednoosiowe od dwuosiowych, a także określić znak optyczny, korzystając dodatkowo z kompensatorów. W celu szczegółowej identyfikacji analizę, w zależności od potrzeb, warto rozszerzyć o badania skaningowym mikroskopem elektronowym SEM z dyfrakcją rentgenowską (EDS), jakościową i ilościową analizę składu pierwiastkowego przy użyciu spektrometru dyspersji długości fali wtórnego promieniowania X-WDS, badania katodoluminescencje, termiczną analizę różnicową (DTA), analizy rentgenowskie (XRF, XRD) (Bolewski, 1982). Podejście do badań powinno być uzależnione od charakteru skał.

W trakcie analiz planimetrycznych należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiednie rozpoznanie mineralogiczne poszczególnych komponentów skał (krzemionkowe, węglanowe lub zbudowane z minerałów ilastych), bowiem dokładne określenie składu mineralnego kolektorów i uszczelnień umożliwi monitorowanie podatności skał na oddziaływania z magazynowanym lub składowanym medium. Dodatkowym atutem jest wykonanie analiz mineralogicznych preparatów nasypowych, wykonanych z rezyduum detrytycznego próbek skalnych (minerały ciężkie, mikromorfologia ziaren kwarcu).

Klastyczne skały zbiornikowe składają się głównie z ziaren detrytycznych, takich jak: kwarc, skalenie, minerały ciężkie oraz litoklasty. Istotnym składnikiem skał zbiornikowych, mającym wpływ na ich właściwości petrofizyczne, są minerały ilaste. Charakterystyczna dla minerałów ilastych jest ich pakietowa struktura, która może być stabilna lub labilna (grupa smektytów):

- chloryty – struktura stabilna typu 2:1:1;
- miki–illity – struktura stabilna typu 2:1, minerały główne: biotyt, muskowit, illit, serycyt, glaukonit;
- kaolinity – struktura stabilna typu 1:1, minerały główne: kaolinit, dickit, nakryt, haloizyt;
- smektyty – struktura labilna typu 2:1, minerały główne: montmorylonit–beidelit, nontronit, saponit.

Grupa smektytów wykazuje znakomite właściwości sorpcyjne, które prowadzą do ich pęcznienia, co wpływa bezpośrednio na porowatość i przepuszczalność skał kolektorskich oraz warstw uszczelniających (Bolewski, 1982).

Przydatnym narzędziem do korelacji, szczególnie w przypadku, gdy materiał wiertniczy jest pozbawiony markerów biologicznych, oraz do określenia stopnia diagenezy badanych utworów jest analiza zespołu minerałów ciężkich. Minerały ciężkie to grupa akcesoryczna skał osadowych, ściśle związana ze skałą macierzystą. W skład tej grupy wchodzą kryształy o gęstości >2,9 Mg/m^3. Ziarna do analizy pozyskuje się przez separacje grawitacyjną pokruszonego materiału skalnego w cieczy ciężkiej o gęstości ok. 2,9 Mg/m^3 (np. $3Na_2WO_4 \cdot H_2O$ – poliwolframian sodu) (Mange, Maurer, 2012). Na skład asocjacji wpływa rodzaj skały macierzystej, środowisko sedymentacji (jego hydrodynamika), warunki wietrzenia w czasie depozycji oraz diageneza (Morton, Hallsworth, 2007; Van Loon, Mange, 2007; Komar, 2007; Cyglicki, Remin, w recenzji).

Charakterystyka zespołów minerałów ciężkich polega na określeniu składu mineralnego, stopnia obtoczenia, stopnia zwietrzenia oraz barwy minerałów (Mange, Wright, 2007; Garzanti, Andò, 2019). W trakcie analizy są obliczane typowe dla frakcji ciężkiej indeksy, jak: wskaźnik dojrzałości petrograficznej ZTR – określa procentowy udział minerałów ultrastabilnych: cyrkon, turmalin, rutyl (Hubert, 1962); wskaźniki proweniencji: ATi – 100 × apatyt/apatyt + turmalin, GZi – 100 × granat/granat + cyrkon, RZi – 100 × rutyl/rutyl + cyrkon, CZi – 100 x spinel chromowy/spinel chromowy + cyrkon, MZi – 100 × monacyt/monacyt + cyrkon (Morton, Hallsworth, 1994); wskaźnik właściwości hydrodynamicznych środowiska sedymentacji: RTidx – 100 × rutyl/rutyl + turmalin (Cyglicki, Remin, w recenzji). Klasyczna analiza przeprowadzana z wykorzystaniem mikroskopu petrograficznego często bywa rozszerzona o badania geochemiczne, w tym m.in. jakościową i ilościową analizę składu pierwiastkowego przy użyciu spektrometru dyspersji długości fali wtórnego promieniowania X-WDS, obejmującą wybrane szeregi minerałów: turmalinów, granatów, amfiboli, piroksenów, apatytów, TiOx (Mange, Morton, 2007) oraz geochronologiczne, z wykorzystaniem m.in. mikrosondy jonowej SHRIMP służącej do izotopowego datowania cyrkonów (np. Zhou i in., 2002; Zanetti i in., 2013). Gdy zostanie rozpoznany skład mineralny i zostanie ustalone pochodzenie ziaren detrytycznych, możemy z powodzeniem korelować ze sobą poszczególne odcinki materiału wiertniczego (Morton, McGill, 2018).

Zmienność zespołu minerałów ciężkich na przestrzeni analizowanego materiału wiertniczego doskonale odzwierciedla wpływ procesów diagenetycznych na badany materiał. Zmiany temperatury i ciśnienia są doskonale obrazowane przez eliminowanie minerałów, których szereg stabilności (od najmniej do najbardziej stabilnych) kształtuje się w sposób następujący: oliwin < orto- i klinopiroksen < piroksen sodowy < amfibol wapniowy, andaluzyt, silimanit < epidot < tytanit < cjanit < amfibol sodowy < staurolit < allanit < granat, chlorytoid < turmalin, monacyt, spinel < rutyl, anataz, brukit, cyrkon, apatyt (Morton, Hallsworth, 2007). Postęp procesów diagenetycznych uwidacznia się także przez zmiany powierzchni minerałów wskaźnikowych takich jak np. granaty (Turner, Morton, 2007).

Badania mineralogiczne mają duże znaczenie w ocenie skał węglanowych. Prawidłowy sposób analizy mikroskopowej węglanów powinien odzwierciedlać ich środowisko depozycji, które w sposób szczególny kształtuje w nich takie cechy jak przepuszczalność i porowatość.

Istnieją ogromne różnice pomiędzy skałami klastycznymi a węglanowymi, które przede wszystkim wynikają z ich genezy. Geneza skał węglanowych jest ściśle związana z procesami chemicznymi oraz biochemicznymi. Część skał węglanowych powstaje na drodze abrazji i erozji starszych utworów węglanowych. Zbudowane są głównie z kalcytu, aragonitu, dolomitu, syderytu, towarzyszących składników detrytycznych takich jak: kwarc, minerały ilaste, minerały ciężkie, krzemionkowe składniki biogeniczne (np. igły gąbek) oraz tlenków i wodorotlenków żelaza i manganu, siarczanów i siarczków. Na porowatość węglanów największy wpływ mają procesy diagenetyczne, które są odpowiedzialne za przemiany fazowe, ługowanie i rozpuszczanie węglanów oraz wtórną krystalizację cementów. W wyniku diagenezy często dochodzi do przemian fazowych prowadzących do zmian porowatości. Przejście aragonitu (~2,95 Mg/m^3) w kalcyt (~2,71 Mg/m^3) skutkuje zwiększeniem objętości skał, a więc zmniejszeniem porowatości węglanów. Dolomityzacja (gęstość dolomitu – 2,84–2,86 Mg/m^3) skał z kolei prowadzi do wzrostu porowatości o 13% objętościowych pierwotnej skały (Plewa M., Plewa S., 1992). Identyfikację faz mineralnych można przeprowadzić, wykonując termiczną analizę różnicową (DTA) (Duźniak, 1969).

Rozpoznanie węglanów bezwodnych jest również możliwe za pomocą metod rentgenowskich (DSH, dyfraktometria) (tab. 56).

Rozróżnienie odmian polimorficznych $CaCO_3$ (głównie w zakresie kalcytu i aragonitu) jest możliwe z wykorzystaniem metod spektrofotometrycznych (spektrofotometria w podczerwieni) (Bolewski, 1982).

3.6.2.1.3. Badania zawartości węglanów

Oznaczenie zawartości węglanu wapnia wykonuję się z użyciem aparatu Scheiblera (PN-EN ISO 10693:2014-06). Aparat składa się z wyskalowanej U-rurki wypełnionej 5% roztworem $CuSO_4$, szczelnie połączonej z kolbą, gdzie zachodzi reakcja próbki z 10% roztworem HCl. Naważkę próbki należy dobrać odpowiednio do orientacyjnej zawartości $CaCO_3$. W przypadku skał węglanowych masa próbki nie powinna przekraczać 0,6 g. Badania prowadzi się na próbkach skalnych wysuszonych do stałej masy w temperaturze 105–110°C i roztartych w moździerzu. Przygotowaną próbkę umieszcza się w kolbie, a następnie wypełnia się zbiorniczek 10% roztworem HCl. Wydzielający się gaz powoduje wyparcie roztworu $CuSO_4$ z ramienia cechowanego do ramienia niecechowanego. Po ustaniu reakcji należy odczytać objętość

Tabela 56

Najmocniejsze refleksy węglanów bezwodnych (przykłady) (wg Bolewskiego, 1982)

Minerał	d	I	d	I	d	I
Kalcyt	0,303	10	0,1912	8	0,1869	9
Dolomit	0,288	10	0,2190	5	0,1785	6
Syderyt	0,279	10	0,2130	7	0,1733	9
Magnezyt	0,273	10	0,2100	9	0,1697	10

d – odległość międzypłaszczyznowa [nm]; I – intensywność refleksu [zliczenia/sek.]

roztworu wypartą przez wydzielający się gaz. Ważne jest zapisanie temperatury i ciśnienia jakie panują w laboratorium. Procentową zawartość $CaCO_3$ oblicza się z wzoru:

$$\%CaCO_3 = \frac{V_t \cdot \mu \cdot 100}{a \cdot 1000}$$

gdzie:

V_t – objętość CO_2 [cm^3],
μ – współczynnik [mg/cm^3] odczytywany z tabel przedstawiających zależność masy $CaCO_3$ jaka jest potrzebna, żeby w danych warunkach ciśnienia i temperatury wydzielić 1 cm^3 CO_2,
a – naważka próbki użyta do badań [g],
1000 – współczynnik przeliczeniowy jednostek.

Alternatywną i dokładniejszą metodą stosowaną do określenia zawartości węglanów jest ilościowa i jakościowa analiza dyfrakcji rentgenowskiej XRD (Jurkowska, 2019).

3.6.2.2. Badania fizyczne

3.6.2.2.1. Badania uziarnienia

Struktura skały bezpośrednio narzuca sposób wykonania analizy uziarnienia – sitowe lub sedymentacyjne. Do badań uziarnienia skał można używać normy dla skał (np. ASTM C110) lub norm stosowanych do badań gruntów (PN-EN ISO 17892-4; PN-B-04481:1988). W przypadku, gdy nie ma możliwości usunięcia ze skał spoiwa w sposób niewpływający na dezintegracje budujących je ziaren, należy wykonać mikroskopową analizę uziarnienia na płytkach cienkich. Wykonanie płytek cienkich skutkuje otrzymaniem przypadkowych przekrojów ziaren mineralnych, których średnice są mniejsze niż rzeczywiste. Pomocne w tym przypadku jest zastosowanie poprawek uwzględniających efekt ścinania ziarna klastycznego. Wyniki analizy granulometrycznych powinny zostać przedstawione w formie krzywych kumulacyjnych lub histogramów, umożliwiających wyliczenie kwartylów (P_{25}, P_{75}), mediany (Md^2), współczynnika wysortowania (S_0) oraz skośności rozkładu (S_k).

Współczynnik wysortowania jest miarą różnorodności skał (Tucker, 2001) wyliczaną z wzoru:

$$S_0 = \frac{P_{75}}{P_{25}}$$

gdzie:

S_0 – współczynnika wysortowania [–],
P_{75} – trzeci kwartyl [–],
P_{25} – pierwszy kwartyl [–].

Na podstawie wartości współczynnika wysortowania można sklasyfikować skały ze względu na uziarnienie (tab. 57).

Skośność rozkładu oblicza się z wzoru (Tucker, 2001):

$$S_k = \frac{P_{25}\, P_{75}}{\mathrm{Md}^2}$$

gdzie:

S_k – skośność rozkładu [–],
P_{75} – trzeci kwartyl [–],
P_{25} – pierwszy kwartyl [–],
Md^2 – mediana [%].

Tabela 57

Kryteria oceny skał ze względu na współczynnik wysortowania (Tucker, 2001)

Klasyfikacja skał	Współczynnik wysortowania S_0
Bardzo dobrze wysortowane	1,000–1,165
Dobrze wysortowane	1,165–1,260
Umiarkowanie wysortowane	1,260–1,600
Źle wysortowane	1,600–2,630
Bardzo źle wysortowane	>2,630

Dodatnia skośność jest charakterystyczna dla grubiejącego ziarna, natomiast skośność ujemna jest charakterystyczna dla frakcji drobniejszej.

3.6.2.2.2. Badania wilgotności

Wilgotność skały określa stosunek masy wody zawartej w próbce skały do masy wysuszonej próbki. Wilgotność można określić metodą wagową (PN-EN 1097-5) na podstawie wzoru:

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} \cdot 100$$

gdzie:

w – wilgotność skały [%],
m – masa próbki skały w stanie naturalnym [Mg],
m_d – masa suchej próbki [g].

Do analizy naturalnej wilgotności w masywie skalnym należy pobrać monolit, a następnie szczelnie go przechowywać, żeby nie dopuścić do szybkiego schnięcia skały. Po zważeniu próbki wilgotnej skałę należy wysuszyć w temperaturze 70°C do uzyskania stałej masy. Wilgotność określa się również podczas badań zmienności parametrów skał przy wpływie wody (nawadnianiu).

3.6.2.2.3. Badania gęstości

Gęstość objętościowa skały to istotna wielkość służąca do ustalania parametrów pochodnych, charakteryzujących strukturę materiału (np. porowatość) lub parametry sprężystości skał (np. moduł Younga, współczynnik Poissona). Sposób przeprowadzenia badania zawarto w normach: PN-EN 1997-2, PN-EN 1936, ASTM D8097, ASTM D4404, ISO 15901-1 lub w instrukcjach ISRM. Gęstość objętościową należy oznaczyć na każdej wyciętej do badań geomechanicznych próbce, na podstawie ustalonej masy oraz objętości wg wzoru:

$$\rho_b = \frac{m}{V}$$

gdzie:

ρ_b – gęstość objętościowa skały [Mg/m^3],
m – masa próbki skały w stanie naturalnym [Mg],
V – objętość próbki skały [m^3].

Objętość próbek może być wyznaczana za pomocą suwmiarki na podstawie pomiarów geometrycznych (wysokości i średnicy walca) lub wg badań piknometrii rtęciowej.

Gęstość właściwa szkieletu skalnego (gęstość) określa stosunek masy szkieletu skały do objętości szkieletu skały, który obliczany jest z wzoru:

$$\rho_r = \frac{m_c}{V_s}$$

gdzie:

ρ_r – gęstość właściwa szkieletu skalnego [Mg/m^3],
m_c – masa szkieletu skalnego (masa sproszkowanej i wysuszonej próbki skały) [Mg],
V_s – objętość szkieletu skalnego (objętość sproszkowanej i wysuszonej próbki skały) [m^3].

Badania wykonuje się z zastosowaniem procedury opisane np. w normach PN-EN 1936, ASTM D5550, ASTM C110 lub w instrukcjach ISRM.

3.6.2.2.4. Badania porowatości

W celu charakterystyki skał konieczne jest wydzielenie petrotypów na podstawie parametryzacji przestrzeni porowej (Friedman, 1978). Możliwe jest wówczas wydzielenie skał o charakterze zbiornikowym lub uszczelniającym, które są najistotniejsze z punktu widzenia składowania lub magazynowania w strukturach geologicznych. Dla wydzielenia poszczególnych petrotypów konieczne jest przeprowadzenie badań uziarnienia, porowatości i gęstości (objętościowej, właściwej) oraz badań przepuszczalności. Parametry, które należy określić to: porowatość, rozkład wielkości porów i kanałów łączących, liczbę kanałów łączących, długość i krętość porów oraz współczynnik łączności porów (Such, 2000). Na podstawie wyżej wymienionych parametrów, wykorzystując specjalistyczne oprogramowanie (np. PoreExpert), budowany jest model przestrzeni porowej 3D. Założenia modelu sieciowego przestrzeni porowej wymagają podziału tej przestrzeni na część kolektorską oraz część transportującą medium. Do wyznaczenia większości z tych parametrów są wykorzystywane badania metodą piknometrii helowej i porozymetrii rtęciowej (MICP).

W trakcie badań porowatości oznaczamy porowatość otwartą oraz porowatość całkowitą (Plewa M., Plewa S., 1992). Na potrzeby wyznaczenia porowatości otwartej pomiar wykonuje się na próbce całej lub zgranulowanej (zachowując przy granulacji przestrzeń porową) w piknometrze helowym (np. urządzeniem AccuPyc) zgodnie z normami ASTM D5550, ASTM C110. W wyniku przeprowadzenia analizy otrzymuje się objętość porów otwartych V_1. Drugi pomiar polega na wyznaczaniu zewnętrznej objętości skały V_2 i jest wykonywany z użyciem piknometrii rtęciowej (wykorzystując port niskich ciśnień porozymetru rtęciowego) lub urządzenia GeoPyc na podstawie procedur opisanych w normach: ASTM D8097, ASTM D4404, ISO 15901-1.

Porowatość otwartą obliczamy z wzoru:

$$P_o = \frac{V_1}{V_2}$$

gdzie:

P_o – porowatość otwarta [-],
V_1 – objętość porów otwartych [cm^3],
V_2 – zewnętrzna objętość skały [cm^3].

Aby otrzymać porowatość całkowitą próbki wykonuje się pomiar z wykorzystaniem piknometru helowego na próbce zmielonej, tak żeby zniszczyć możliwie wszystkie pory. W wyniku pomiaru otrzymuje się objętość szkieletu skalnego (V_3).

$$P_c = \frac{V_2 - V_3}{V_3}$$

gdzie:

P_c – porowatość całkowita [–],
V_2 – zewnętrzna objętość skały [cm^3],
V_3 – objętość szkieletu skalnego [cm^3].

Z wykorzystaniem wyników pochodzących z piknometrii rtęciowej (objętość obwiedniowa próbki), gdy znana jest masa próbki, oznaczamy gęstość objętościową skały (rozdz. 3.6.2.2.3):

$$\rho_b = \frac{m}{V_2}$$

gdzie:

ρ_b – gęstość objętościowa skały [Mg/m^3],
m – masa próbki skały [Mg],
V_2 = V – objętość próbki skały [m^3].

Znając masę próbki oraz objętość szkieletu skalnego V_3, oznaczamy gęstość właściwą skały (rozdz. 3.6.2.2.3) zgodnie z worem:

$$\rho_r = \frac{m_c}{V_3}$$

gdzie:

ρ_r – gęstość właściwa szkieletu skalnego [Mg/m^3],
m_c – masa szkieletu skalnego [Mg],
V_3 = V_s – objętość szkieletu skalnego [m^3].

Badanie porowatości możemy wykonywać za pomocą porozymetrii rtęciowej (MICP), wykorzystując normy: ASTM D4404, ISO 15901-1. Badanie w porozymetrze rtęciowym opierają się na równomiernym wnikaniu do porowatego materiału pod zadanym ciśnieniem niezwilżającej i nieaktywnej cieczy roboczej, czyli rtęci. W efekcie badania otrzymywana jest objętość całkowita porów w próbce, geometryczny rozkład objętości porów i ich całkowite pole powierzchni wraz z medianą, gęstość objętościową szkieletu i pozorną gęstość właściwą szkieletu gruntowego/skalnego, a także porowatość efektywną. Otrzymane wyniki zwykle są przedstawione na krzywych kumulacyjnych – nasycenie rtęcią przestrzeni porowej (%) do średnicy porów (μm). Analiza kształtu krzywych kumulacyjnych pozwala na wyróżnienie charakterystycznych punktów:

- **ciśnienie wejścia** – punkt, w którym rtęć zaczyna wnikać w głąb próbki;
- **średnica wejścia** – punkt, w którym rtęć nasyciła 10% przestrzeni międzyziarnowej;
- **średnica progowa** – pierwszy punkt przegięcia krzywej wyznaczający moment, w którym zachodzi ciągły prze-

pływ cieczy niezwilżającej przez próbkę (im większa średnica progowa próbki, tym większa przepuszczalność).

Krzywe kumulacyjne są wykonywane zarówno w trakcie nasycenia próbki rtęcią (krzywa intruzji), jak i gdy dochodzi do rozprężenia ciśnienia w aparacie, a rtęć jest wyciskana z porów (krzywa ekstruzji). Pomiędzy krzywymi ekstruzji i intruzji dochodzi do przesunięcia, nazywanego **efektem histerezy**[47], co wskazuje na uwięzienie pewnej ilości rtęci w przestrzeni porowej. Im bliżej obie krzywe są względem siebie położone, tym przestrzeń porowa próbki lepiej transportuje płyn złożowy.

Przebieg krzywej ekstruzji powyżej krzywej intruzji świadczy o tym, że przestrzeń porowa jest reprezentowana przez duże pory połączone siecią kanalików, które określają zdolność transportu płynów (Such, 2000). W przypadku, gdy krzywa ekstruzji jest poniżej, to przestrzeń porowa zbudowana jest z porów o lejkowatym kształcie, które tworzą pułapki dla migrującej rtęci (Such, 2000, 2002).

Wyniki badań porozymetrycznych są również przedstawiane w postaci krzywej różnicowej o logarytmicznej osi, gdzie wysokość oraz liczba pików modalnych na krzywej oddaje informacje na temat jednorodności – stopnia wysortowania przestrzeni porowej (Such, 2000). Innym sposobem przedstawienia wyników badań MICP jest wykorzystanie krzywych typu $log(V) - log(P)$[48], które służą parametryzacji przestrzeni porowej, a w szczególności pozwalają zobrazować budowę fraktalną sieci i przeprowadzić analizę wymiaru fraktalnego. Analiza wymiaru fraktalnego polega na możliwości oszacowania udziału kanałów łączących pory, a więc jaki procent przestrzeni porowej bierze udział w transporcie płynów złożowych (Katz, Thompson, 1987; Such, 1998, 2002; Peitgen i in., 1995; Such i in., 2015, 2017). Na tej podstawie można określić porowatość efektywną (n_e) oraz przepuszczalność (k_p). Badanie MICP ponadto pozwala na określenie rozmiaru średniej kapilary, sumarycznej powierzchni porów, która przypada na jednostkę objętości skały oraz np. obliczyć powierzchnię właściwą.

3.6.2.2.5. Badania nasiąkliwości

Nasiąkliwość skały określa jej zdolność do wchłaniania wody przy ciśnieniu atmosferycznym. Badanie można wykonywać, stosując procedurę opisaną w normie PN-EN 13755. Przygotowane próbki należy umieścić w pojemniku, a następnie dodać wodę wodociągową do połowy ich wysokości (czas t_0). Kolejno po czasie $t_0 + 60$ (±5) min. należy podwyższyć poziom wody do trzech czwartych wysokości próbek oraz po $t_0 + (120 \pm 5)$ do całkowitego zanurzenia próbek na głębokość 25 (±5) mm. Po upływie 48h próbki należy zważyć i ponawiać pomiar do osiągnięcia stałej masy.

Nasiąkliwość wagową oblicza się z wzoru:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100$$

gdzie:

A_b – nasiąkliwość wagowa [%],
m_s – masa nasyconej próbki [g],
m_d – masa suchej próbki [g].

Nasiąkliwość objętościową oblicza się z wzoru:

$$n_o = \frac{m_s - m_d}{\rho_{Rh} \cdot \mathrm{V}} \cdot 100$$

gdzie:

n_o – nasiąkliwość objętościowa [%],
m_s – masa nasyconej próbki [g],
m_d – masa suchej próbki [g],
ρ_{Rh} – gęstość wody [g/cm^3],
V – objętość próbki [cm^3].

W skałach porowatych duże znaczenie ma również nasiąkliwość kapilarna oznaczana prostopadle do płaszczyzny anizotropii (PN-EN 1925). Woda może podsiąkać kapilarnie w górę, jak i na boki. Prędkość nasiąkania i ilość podciągniętej wody uzależniona jest od wielkości porów i kapilar w skale. Aby oznaczyć ten parametr przygotowane próbki są zanurzane w wodzie na głębokość 3 (±1) mm. Należy utrzymywać stały poziom wody podczas badania. Próbkę trzeba wyjmować i ważyć po upływie odpowiednio dobranego czasu, zachowując minimalną liczbę siedmiu pomiarów (w przypadku skał mało nasiąkliwych odległość między kolejnymi pomiarami powinna być dłuższa). Wartość nasiąkliwości oznacza się stosunkiem:

$$Y = \frac{m_i - m_d}{\mathrm{A}}$$

gdzie:

Y – nasiąkliwość kapilarna [g/m^2],
m_i – kolejne masy próbki w trakcie badania [g],
m_d – masa suchej próbki do badania [g],
A – pole powierzchni próbki zanurzonej w wodzie [m^2].

Do pełnej analizy należy wykreślić krzywą nasiąkliwości kapilarnej kolejnych pomiarów od czasu.

3.6.2.2.6. Badania rozmakalności

Rozmakalność opisuje zachowanie się skał pod wpływem wody i służy do oceny jakościowego wpływu wody na spójność skał. Rozmakalność określa się z zastosowaniem metody Skutty (Skutta, 1962 za Kidybiński, 2004) lub metody testu trzydobowego (Kidybiński, 1979, 1982, 1985 za Kidybiński, 2004). Proces jednokrotnego lub wielokrotnego moczenia materiału pozwala na oszacowanie utraty spójności i nośności skał pod wpływem wody.

Metoda Skutty (Skutta, 1962 za Kidybiński, 2004) polega na umieszczeniu trzech nieforemnych brył o wymiarach ok. 10 × 10 × 10 cm w naczyniu wypełnionym wodą kopalnianą. Stadia rozpadu są odnotowywane po czasie kolejno 30 min, 4 h oraz 48 h. Ocena wpływu wody na próbkę jest zapisywana przy każdym z kolejnych pomiarów literą o następujących znaczeniach:

– A – próbka nie zmienia postaci;

[47] Efekt histerezy jest podawany w procentach i określa stopień oddalenia krzywych intruzji i ekstruzji przy ciśnieniu 0,12 MPa.

[48] V – objętość przestrzeni porowej [ml], P – ciśnienie [MPa].

– B – próbka dzieli się na warstwy wzdłuż płaszczyzn uławicenia (przy lekkim ostukaniu np. końcem ołówka);
– C – próbka dzieli się samoczynnie na warstwy wzdłuż płaszczyzn uławicenia;
– D – próbka rozpada się na kawałki o długości krawędzi ponad 3 cm (przy ostukaniu);
– E – próbka rozpada się samoczynnie na kawałki o długości krawędzi ponad 3 cm;
– F – próbka rozpada się na kawałki o długości krawędzi poniżej 3 cm (przy ostukaniu);
– G – próbka rozpada się samoczynnie na kawałki o długości krawędzi poniżej 3 cm;
– H – próbka rozpada się samoczynnie na grysik albo muł.

Wynik jest określany 3-literowym kodem oznaczającym stan skały w kolejnych pomiarach (np.: AAA, ACE).

Test trzydobowy (Kidybiński 1979, 1985 za Kidybiński, 2004) wykonuje się z użyciem wody wodociągowej, poddając próbki z rdzenia wiertniczego cyklom moczenia. Próbki o stosunku średnicy i wysokości ok. 1,0 należy zatopić na podstawkach w wodzie na 24h, następnie wynurzyć i zostawić na 24h na powietrzu, po czym ponownie zanurzyć na 24h. Po wykonaniu badania określa się wskaźnik rozmakalności *r* na podstawie oceny makroskopowej próbek zgodnie z tabelą 58.

3.6.2.2.7. Badania termiczne

Badania termiczne skał pozwalają na określenie m.in. przewodności cieplnej λ [W/K·m]. Laboratoryjne pomiary przewodności cieplnej można wykonywać metodą *non-steady state* (metoda igły termicznej w stanie nieustalonym), *steady-state* (pomiar gęstości strumienia ciepła w stanie ustalonym) lub skaningu optycznego.

Metoda igły termicznej może być przeprowadzona za pomocą urządzenia do pomiaru właściwości termicznych Tempos (METER Group, 2018–2021) i sondy igłowej RK-3, która jest umieszczana w otworze wywierconym w materiale skalnym. Otwór powinien mieć wymiary odpowiadające wymiarom igły, a pył powstały przy wierceniu należy usunąć za pomocą skompresowanego powietrza oraz należy zastosować środek zapewniający jak najlepszy kontakt igły ze skałą (pasta silikonowa, pasta do zębów). Badanie należy prowadzić w inkubatorze termicznym w stałych warunkach temperaturowych. Po umieszczeniu igły w skale należy odczekać 15 min w celu wyrównania temperatury między próbką a sondą. W jednym otworze powinny być wykonywane trzy pomiary, a wyniki uznaje się za prawidłowe, jeżeli nie odbiegają one od siebie o więcej niż 10%

Kolejną sondą igłową, którą można zastosować podczas badania skał, jest sonda planarna HLQ (dysk termiczny) i miernik właściwości termicznych TK04 (TK04 2019). Przygotowanie próbki polega na wycięciu na pile tarczowej prostopadłościanu w taki sposób, żeby uzyskać dwie płaskie, równoległe do siebie powierzchnie. Próbka musi mieć średnicę nie mniejszą niż dany dysk oraz wysokość min. 20 mm. Dysk umieszczany jest na jednej z płaskich stron przygotowanej skały. Zaleca się zaaplikować na sondę cienką warstwę pasty termoprzewodzącej. Próbkę z dyskiem umieszcza się w prasie dociskowej utrzymującej siłę nacisku 10 barów. Wykonuje się pięć pomiarów, a wyniki uznaje się za prawidłowe, jeżeli nie odbiegają one od siebie o więcej niż 2%.

Metoda *steady-stade* opiera się na pomiarze gęstości strumienia ciepła, przepływającego przez umieszczoną między dwiema płytami próbkę w jednym kierunku, przy zadanym przez operatora gradiencie temperatury. Przygotowanie próbki polega na wycięciu walca o wysokości do 25 mm i średnicy w przedziale 50–62 mm. Podstawy walca powinny być płaskie i równoległe. Próbka jest umieszczana w stacjonarnej sondzie FOX50 między dwiema płytami w komorze pomiarowej. Do obliczeń wartości przewodności termicznej przyjmuje się średnią z zadanej liczby pomiarów, wykonanych po ustabilizowaniu się przepływu strumienia ciepła przez całą objętość próbki.

Metoda skaningu optycznego opiera się na skanowaniu powierzchni próbki za pomocą skupionego, ruchomego i stałego źródła ciepła w połączeniu z podczerwonymi czujnikami temperatury. Pomiar dokonywany jest na mierniku TCS (*Thermal Conductivity Scanner*). Skaner wykonuje pomiar wzdłuż próbki w sposób ciągły, co pozwala uzyskać profil przewodności. Dzięki temu możliwy jest pomiar rdzeni z głębokich otworów wiertniczych bez ich niszczenia. Dodatkowo urządzenie bada wartość dyfuzyjności termicznej próbki (TCS Manual, 2022).

Badania parametrów termicznych można wykonywać w stanie powietrzno-suchym, nawodnionym, a także

Tabela 58

Oznaczenie wskaźnika rozmakalności skał wg testu trzydobowego (Kidybiński 1979, 1982, 1985 za Kidybiński, 2004)

Stan próbek skał po teście trzydobowym	Wskaźnik rozmakalności *r* [–]
Próbka nie zmienia formy ani konsystencji	1,0
Próbka pęka wzdłuż powierzchni uwarstwienia	0,8
Próbka pęka wzdłuż powierzchni uwarstwienia oraz rzadko w kierunkach prostopadłych do powierzchni uwarstwienia	0,6
Próbka pęka gęsto w wielu kierunkach	0,4
Próbka rozkłada się na rumosz ze szlamem	0,2
Próbka rozkłada się całkowicie na szlam	0,1

z uwzględnieniem wpływu różnych temperatur (grzanie/zamarzanie). Parametry cieplne pomierzone w skałach stanowią istotne dane wykorzystywane w celu modelowania numerycznego magazynów i składowisk.

Metoda igły termicznej jest opisana w normie ASTM D5334, pozostałe procedury pomiarowe są wykonywane na podstawie procedur własnych, instrukcji do aparatury badawczej oraz dostępnej literatury.

3.6.2.2.8. Badania przepuszczalności

Przepuszczalność to zdolność skały do transportu płynów złożowych. Jej miarą jest współczynnik przepuszczalności k_p, który jest określony dla laminarnego przepływu płynu złożowego przez równanie Darcy'ego:

$$q = \frac{c \cdot k_p \cdot A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

gdzie:

q – przepływ [m³/s],
c – stała liczbowa zależna od rodzaju użytych jednostek [–],
k_p – przepuszczalność [mD],
A – przekrój poprzeczny przepływu [m²],
μ – lepkość [cP]
$\Delta P/\Delta x$ – gradient ciśnienia [At].

W warunkach pełnej saturacji, gdy pomiar prowadzony jest z zachowaniem przepływu laminarnego, przepuszczalność jest zależna tylko i wyłącznie od przestrzeni porowej próbki.

W zależności od użytego w badaniach płynu wyróżniamy badania przepuszczalności typu woda–ropa, woda–gaz.

Badanie przepuszczalności typu woda–gaz jest przeprowadzane z użyciem azotu. Do analizy wykorzystuje się próbki o średnicy cala i wysokości 3–4 cm (Such, 2000). Pobocznica próbki musi być uszczelniona. Po doprowadzeniu do ustalonego przepływu gazu przez próbkę, wykorzystuje się pomiar polegający na uchwyceniu migrującej przez walec objętości gazu w jednostce czasu oraz jego ciśnienie na wejściu i wyjściu (odpowiednio P_1 i P_2). Po uwzględnieniu poprawki na ściśliwość gazu, przepuszczalność (współczynnik przepuszczalności) oblicza się z wzoru po jego przekształceniu:

$$q_r = \frac{c \cdot k_p \cdot A \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{T \cdot L \cdot \mu \cdot Z}$$

gdzie:

q_r – wydatek w warunkach normalnych [m³/s],
c – stała liczbowa zależna od rodzaju użytych jednostek [–],
k_p – przepuszczalność (współczynnik przepuszczalności) [mD],
A – przekrój poprzeczny przepływu [m²],
P_1^2, P_2^2 – różnica ciśnień na wejściu i wyjściu walca [At],
T – temperatura [°C],
L – długość walca [m],
μ – lepkość [cP],
Z – poprawka na ściśliwość gazu [–].

Badanie powinno być wykonane dla przynajmniej trzech różnych ciśnień. Wyniki należy powiązać funkcją:

$$k_p = f\left(\frac{1}{P}\right)$$

gdzie:

P – ciśnienie przepływu [At].

Nachylenie powstałej krzywej posłuży następnie do obliczenia poprawki związanej z efektem Klinkenberga, wg zależności (De Wiest, 1969; Such, 2000; Such i in., 2007):

$$k_k = k_p - m \cdot \frac{1}{P}$$

gdzie:

k_k – przepuszczalność ekstrapolowana dla nieskończonego ciśnienia równa przepuszczalności pomierzonej dla nieściśliwej, niewchodzącej w interakcję ze skałą cieczy [mD],
k_p – przepuszczalność [mD] zmierzony dla danego, średniego ciśnienia przepływu P,
P – ciśnienia przepływu [At],
m – współczynnik Klinkenberga [–].

Badania przepuszczalności można także przeprowadzić w wariancie przepuszczalności względnych. W metodzie tej są wykorzystywane takie same próbki jak w metodzie opisanej powyżej. W trakcie badania używa się więcej niż jeden płyn złożowy w układach woda–ropa, woda–gaz, ropa–gaz. W trakcie pomiarów zmianie ulega stopień nasycenia poszczególną fazą – od 0 do 100% nasycenia poszczególnymi fazami (Such i in., 2000). Ze względu na złożoność interakcji pomiędzy płynami złożowymi a skałą, badanie to należy do najbardziej złożonych analiz petrofizycznych.

Ponadto, uzyskanie parametru przepuszczalności jest możliwe za pomocą metod obliczeniowych opierających się na wynikach analizy porowatości MICP (rozdz. 3.6.2.2.4).

Ze względu na coraz częstszą konieczność wykonywania badań przepuszczalności w ośrodkach mikroprzepuszczalnych (przepuszczalności w zakresie od 10 nD do 0,1 mD), konieczna jest zmiana klasycznego podejścia analitycznego. Powodem jest czas wymagany do ustalenia się stanu przepływu (Wojnicki i in., 2018). Z powyższych względów opracowano wiele metod opierających się na nieustalonym stanie przepływu. Najważniejsza z nich wykorzystuje zjawisko zanikania impulsu ciśnienia (*pressure pulse decay*). Badanie opiera się na rozwiązaniu analitycznym dla różnicy ciśnień w funkcji bezwymiarowego czasu zaproponowanym przez Dickera i Smits (Dicker, Smits, 1988; Wojnicki i in., 2018).

3.6.3. Badania geomechaniczne

Określenie relacji między stanem naprężenia a rozwojem odkształceń w czasie jest głównym celem badań geomechanicznych. Skały często wykazują złożoną relację, której własności opisuje się odpowiednimi modelami mechanicznymi. Zwykle wykorzystuje się uproszczone typy deformacji, które obejmują sprężyste (odwracalne i ciągłe), lepkie (nieodwracalne i ciągłe), plastyczne i kruche zachowanie materiałów (tab. 59: pozycje 1–3). Zachowania te w przypadku materiałów np. liniowych sprężystych określa prawo Hooke'a, w przypadku materiałów lepkich liniowych – prawo Newtona, natomiast deformację plastyczną wyznaczają różne kryteria wytrzymałościowe. Przez łączenie ze sobą uproszczonych typów deformacji próbuje opisać się rzeczywiste

właściwości mechaniczne materiałów np. lepko-sprężyste czy sprężysto-plastyczne (przykłady czterech modeli złożonych przedstawiono w tabeli 59: pozycje 4–7).

Użyteczność poszczególnych modeli zależy od charakterystyki samych materiałów. Przykład różnego podejścia prezentowanego w literaturze do opisu geomechanicznego skał zaprezentowano na przykładzie soli kamiennej w części II poradnika – rozdz. 5.4.10.

Badania geomechaniczne próbek skał na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania, wg norm i pozycji literaturowych[49], podzielono na badania dynamiczne i badania statyczne (wytrzymałościowo-odkształceniowe).

Właściwości i parametry mechaniczne, w tym wytrzymałościowe i odkształceniowe próbek skał (patrz: cz. II, rozdz. 4 – tab. 61), są niezbędne do określenia właściwości geomechanicznych kolektorów i uszczelnień na potrzeby utworzenia geomechanicznego modelu obiektu podziemnego.

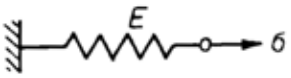
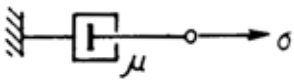
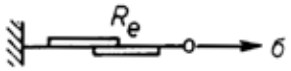
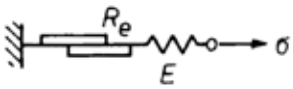
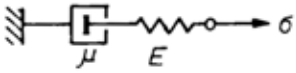
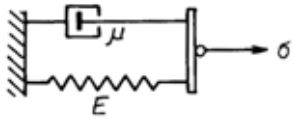
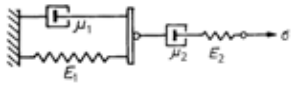
[49] PN-EN 1997-2:2009, prEN 1997-2:2022 (E), instrukcje ISRM (Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2014), Hobler, 1977; Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b; Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013; Wytyczne..., 2019.

Zwykle zakłada się sprężysty model zachowania ośrodka. Podstawowymi parametrami takich modeli są parametry sprężyste oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie. Dla skał uszczelnienia istotne są również właściwości niesprężyste, takie jak pełzanie, a w przypadku skał warstwowanych np. łupków – anizotropia wszelkich parametrów mechanicznych. Podkreślić należy, że w przypadku anizotropii, charakterystycznej dla kompleksów osadowych, podstawową rolę w analizach obiektów odgrywają parametry mechaniczne określane w kierunku poziomym.

W zależności od zaawansowania technologicznego wykorzystywanej aparatury badawczej oraz stosowanych procedur badawczych, badania geomechaniczne mogą być prowadzone w warunkach zmiennych ciśnień, z zastosowaniem różnych ścieżek naprężeń, w różnych warunkach temperaturowych, na próbkach o różnej wilgotności (stan powietrzno-suchy, po wysuszeniu, po nawodnieniu,), na próbkach po cyklach zamrażania, na próbkach po sezonowaniu różnymi czynnikami (oddziaływanie gazów i pyłów), a także na próbkach różnie zorientowanych w badaniach w stosunku do ich uwarstwienia (anizotropia). Przekrój badań w różnych stanach daje pełniejszy obraz odporności skał i pozwala określić

Tabela 59

Uproszczone i złożone modele reologiczne

Lp.	Nazwa modelu	Schemat modelu	Opis modelu	
Modele podstawowe				
1	Sprężysty (Hooke'a)		$\sigma = E\varepsilon$	jest to model przedstawiający liniowy związek między naprężeniem (σ) a odkształceniem (ε), gdzie E jest modułem Younga
2	Lepki (Newtona)		$\sigma = \mu\dot{\varepsilon}$	jest to model przedstawiający liniowy związek między naprężeniem (σ) a prędkością odkształcenia ($\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$), gdzie μ to lepkość
3	Plastyczny (Saint-Venanta)		$\varepsilon = 0$ dla $\sigma < R_e$	jest to model w którym ciało nie ulega deformacji poniżej krytycznej wartości R_e. Przy $\sigma = R_e$ odkształcenia trwałe rosną nieograniczenie
Modele złożone				
4	Sprężysto-plastyczny		$\varepsilon = \sigma/E$ dla $\sigma < R_e$ $\varepsilon \geq 0$ dla $\sigma = R_e$	jest to model sprężysto-plastyczny, który powstał przez szeregowe połączenie modelu Hooke'a i modelu plastycznego
5	Lepko-sprężysty (Maxwella)		$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/\mu$	jest to model lepko-sprężysty, który powstał przez szeregowe połączenie modelu Hooke'a i modelu Newtona
6	Lepko-sprężysty (Kelvina-Voigta)		$\sigma = E\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon}$	jest to model lepko-sprężysty, który powstał przez równoległe połączenie modelu Hooke'a i modelu Newtona
7	Lepko-sprężysty (Burgersa)		–	jest to model lepko-sprężysty, który powstał przez równoległe połączenie modelu Maxwella i Kelvina-Voigta

ryzyko deterioracji. W badaniach geomechanicznych należy się kierować ogólnym zaleceniem, że powinny być prowadzone w warunkach naprężenia, temperatury i wilgotności zbliżonych do rzeczywistych panujących w masywie skalnym.

3.6.3.1. Badania dynamiczne. Pomiar prędkości fali sprężystej i wyznaczanie dynamicznych parametrów sprężystości

Na wszystkich próbkach, bezpośrednio po ich wycięciu z rdzenia wiertniczego, należy przeprowadzić nieniszczące badania ultradźwiękowe z pomiarem prędkości fali podłużnej (*Vp*) i, o ile to możliwe, poprzecznej (*Vs*) oraz powierzchniowej (V_R).

Badania ultradźwiękowe mają na celu określenia dynamicznych parametrów sprężystości próbek skał oraz właściwości akustycznych opisanych przez wartości prędkości propagacji fal sprężystych o dużej częstotliwości (patrz: cz. II, rozdz. 4). Prędkość propagacji fali sprężystej jest ustalana jako:

$$(Vp,\ Vs) = \frac{droga}{czas}\left[\frac{m}{s}\right]$$

Prędkości fal sprężystych – podłużnej (*Vp*) i poprzecznej (*Vs*), powiązane są z gęstością objętościową (ρ_b) za pomocą podstawowych równań konstytutywnych. Fala podłużna, kompresyjna (P) jest kontrolowana przez dynamiczny moduł Younga (E_d), podczas gdy fala poprzeczna, ścinająca (S), zależna jest od dynamicznego modułu ścinania (G_d). Można je zatem oznaczyć na podstawie następujących uproszczonych formuł (Hobler, 1977; Pinińska, Karska, 1986 za Pinińska, 1994; Pinińska, 1996, 1999, 2000d, 2003, 2011; Pinińska, Dziedzic, 2006; Domonik, 2012a):

$$Vp = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_b}} \qquad E_d = \rho Vp^2$$

$$Vs = \sqrt{\frac{G_d}{\rho_b}} \qquad G_d = \rho Vs^2$$

gdzie:

E_d – dynamiczny moduł Younga [GPa],
G_d – dynamiczny moduł ścinania [GPa],
ρ_b – gęstość objętościowa [Mg/m^3],
Vs – prędkość fali poprzecznej S [m/s],
Vp – prędkość fali podłużnej P [m/s].

Dynamiczny moduł Helmholtza[50] (K_d) wiąże z prędkością fali podłużnej (*Vp*) oraz dynamicznym modułem ścinania (G_d) zgodnie z formułą:

$$K_d = \rho Vp^2 - \tfrac{4}{3}G_d$$

gdzie:

K_d – dynamiczny moduł Helmholtza [GPa],
G_d – dynamiczny moduł ścinania [GPa],
ρ_b – gęstość objętościowa [Mg/m^3],
Vp – prędkość fali podłużnej P [m/s].

[50] Moduł izotropowego odkształcenia objętościowego (syn.).

Znajomość prędkości *Vp*, jak i *Vs* umożliwia wyznaczenie dynamicznego współczynnika Poissona (v_d) na podstawie formuł:

$$v_d = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)}$$

gdzie:

v_d – dynamiczny współczynnik Poissona [–],
Vs – prędkość fali poprzecznej S [m/s],
Vp – prędkość fali podłużnej P [m/s].

Oznaczenia (E_d) oraz (v_d) można wykorzystać do ustalenia wartości dynamicznego modułu Helmholtza (K_d), dynamicznego modułu ścinania (G_d) oraz stałej Lamégo (L_d), stosując następujące formuły (Hobler, 1977; Pinińska, Karska, 1986 za Pinińska, 1994; Pinińska, 1996, 1999, 2003; Pinińska, Dziedzic, 2006; Domonik, 2012a; Tajduś i in., 2012):

$$K_d = \frac{E_d}{3(1-2v_d)} \qquad G_d = \frac{E_d}{2(1+v_d)} \qquad L_d = \frac{E_d \cdot v_d}{(1+v_d)(1-2v_d)}$$

Pomiar fali powierzchniowej (V_R) można wykorzystać do analizy zmienności parametrów sprężystości jako wartość pomocniczą, uzupełniającą pomiar fali poprzecznej (*Vs*). Przyjmując, że $V_R = 0{,}9 \cdot Vs$, można wyznaczyć pośrednio dynamiczny współczynnik Poissona (v_d) oraz dynamiczny moduł Younga (E_d) (Filipczyński i in., 1959 i Pinińska, 1986 za Domonik, 2012b).

W warunkach laboratoryjnych najczęściej stosuje się pomiar czasu przejścia fali sprężystej przez znormalizowaną próbkę skalną, otrzymując w ten sposób wypadkową prędkość na drodze między głowicą nadawcza a odbiorczą. Prędkość przejścia fali zależy od litologii, struktury, tekstury, stopnia upakowania ziaren mineralnych w skale. W badaniach próbek skalnych o niewielkich laboratoryjnych wymiarach wykorzystuje się do tego fale o dużej częstotliwości (ultradźwiękowe). Dzięki temu zapewniony jest warunek pomiaru w ośrodku quasi-nieograniczonym. Wymiar próbek do badań nie powinien być mniejszy niż mierzona w ośrodku 3-krotna długość fali o danej częstotliwości.

Istotną zaletą badań ultradźwiękowych jest ich charakter nieniszczący. Po oznaczeniu dynamicznych parametrów sprężystości (E_d, v_d, G_d, K_d) na podstawie równań konstytutywnych teorii sprężystości, możliwe jest dalsze wykorzystanie próbek do badań wytrzymałościowych w celu oznaczenia statycznych parametrów sprężystości (E_{st}, v_{st}, G_{st}, K_{st}) na tych samych próbkach (rozdz. 3.6.3.2.3). Zaleca się prowadzenie pomiarów z zastosowaniem impulsu generowanego przez głowicę nadawczą o częstotliwości od 0,5 do 2MHz, w zależności od charakteru tłumienia fali w ośrodku.

Należy pamiętać, że dynamiczne parametry sprężystości (E_d, v_d, G_d, K_d) są wyznaczane w zakresie sprężystych odkształceń przedkrytycznych, natomiast statyczne parametry sprężystości (E_{st}, v_{st}, G_{st}, K_{st}) – w zakresie liniowo-sprężystych odkształceń przedkrytycznych.

Korzystnym elementem badań ultradźwiękowych jest łatwość oceny anizotropii materiału skalnego. Niejednorodność skał powoduje, że sygnały ultradźwiękowe w próbce mogą być przenoszone z różną prędkością zależnie od

kierunku pomiaru. Lokalne pory, laminy, mikroszczeliny, kierunkowość ułożenia ziaren mineralnych powodują tłumienie fali i są przyczyną znacznych różnic w prędkości propagacji fal ultradźwiękowych zależnie od orientacji próbki. Kierunkowe badania prędkości mogą być prowadzone pod dowolnym kątem na obwodzie próbki dla wykrywania poszczególnych efektów niejednorodności materiału, jak np. utajone kierunki mikrospękań, kierunkowe wydłużenie ziaren skalnych itp. Jeżeli nie ma potrzeby tak szczegółowej analizy, pomiary czasu przejścia fali ultradźwiękowej należy prowadzić we wzajemnie prostopadłych kierunkach: zgodnym z osią próbki walcowej ($Vp\|$) oraz dwóch kierunkach do osi próbki prostopadłych ($Vp\perp$) mierzonych na pobocznicy walca. Na podstawie badań kierunkowych ustala się anizotropię ośrodka, wyrażoną współczynnikiem anizotropii akustycznej :

$$A = \frac{Vp_{\|}}{Vp_{\perp}}$$

gdzie:

A – współczynnikiem anizotropii akustycznej [–],

Vp|| – prędkość fali podłużnej podłużnej w kierunku równoległym do osi próbki [m/s],

Vp⊥ – prędkość fali podłużnej podłużnej w kierunku prostopadłym do osi próbki [m/s].

Podkreślić należy, że w przypadku anizotropii, charakterystycznej dla niektórych kompleksów skał warstwowanych, podstawową rolę w modelowaniu obiektów podziemnych odgrywają parametry sprężyste określane w kierunku poziomym. Aby uzyskać użyteczne dane o anizotropii właściwości sprężystych, wyniki analiz laboratoryjnych należy zintegrować z pomiarami dipolowej sondy akustycznej (badania wykonywane w otworze wiertniczym). Sonda akustyczna dostarcza bezpośrednio dane pozwalające na wyznaczenie wielkości dynamicznych parametrów sprężystości w różnych kierunkach. Są one użyteczne w zaawansowanych modelach anizotropii mechanicznej na podstawie obrazowania sejsmicznego 3D. Na potrzeby analizy szczegółowego rozwarstwienia mechanicznego badanego obiektu podziemnego potrzebne są statyczne parametry sprężystości. Wyznacza się je na podstawie kalibracji parametrów dynamicznych (sondy) parametrami statycznymi wyznaczonymi laboratoryjnie (Wojtowicz, Jarosiński, 2019). Podobne zabiegi można wykonać w celu wyznaczenia profilu wytrzymałości jednoosiowej i jej anizotropii (Wojtowicz i in., 2021).

3.6.3.2. Badania statyczne (wytrzymałościowo-odkształceniowe)

Celem badań statycznych jest ustalenie charakterystyki wytrzymałościowo-odkształceniowej skał na podstawie zależności naprężenie (σ)–odkształcenie (ε) oraz określenie parametrów wytrzymałości i odkształcenia, w tym statycznych parametrów sprężystości (patrz: cz. II, rozdz. 4 – tab. 61) na podstawie wyników:

- badań wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe;
- badań wytrzymałościowych w warunkach trójosiowego ściskania.

Badania wytrzymałościowe mają na celu ustalenie mechanizmów zniszczenia i typów zniszczenia skał, wyznaczenie obwiedni wytrzymałości skał wg ustalonego kryterium wytrzymałościowego oraz stanów granicznych wytrzymałości w zmiennych warunkach ciśnień, temperatur, przy różnych ścieżkach obciążeń, rożnych stanach próbek skał, a także anizotropii wytrzymałości zwłaszcza skał uwarstwionych.

Badania odkształceniowe są wykonywane na potrzeby charakterystyki przebiegu procesu deformacji ośrodka skalnego w zmiennym polu naprężenia oraz jego anizotropii.

Wielkość ziaren, ich kształt i sposób ułożenia, szorstkość powierzchni nieciągłości rzutują na właściwą danej skale dynamikę stopniowej destrukcji struktury (pękania, zniszczenia, odkształcenia, pełzania), co jest manifestowane przebiegiem krzywej deformacji (rys. 67). Efekty pękania zaznaczają się na niej charakterystycznymi pętlami histerezy odkształceń osiowych, obwodowych i objętościowych (Hallbauer i in., 1973 za Pinińska, 2017; Łukaszewski, 2013).

Na podstawie krzywej deformacji są wyznaczane wartości naprężenia i odkształceń jakie dana skała jest w stanie przenosić w danych warunkach stanu naprężenia w zakresie odkształceń przedkrytycznych, pokrytycznych i rezydualnych (rys. 68).

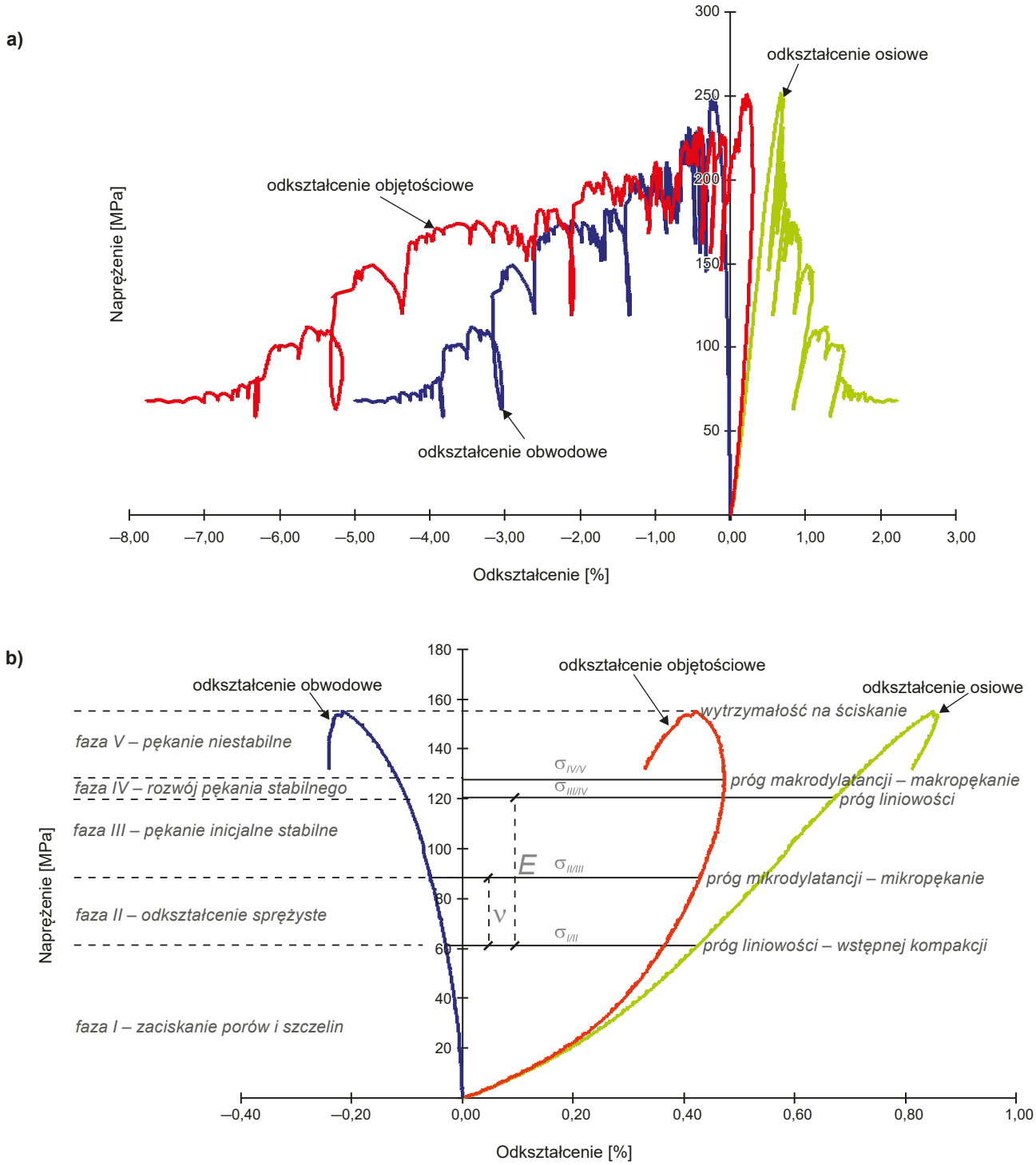
Według Hallbauera i in. (1973) na krzywej naprężenie–odkształcenie w zakresie odkształceń przedkrytycznych wyróżnia się pięć faz, które odpowiadają kolejnym etapom procesu pękania (Pinińska, 1994, 1996, 1999, 2003, 2017; Pinińska, Dziedzic, 2006; Domonik, 2012a; Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013) (rys. 67b):

- Faza I – faza nieliniowego odkształcenia związana z zamykaniem się porów i szczelin (faza kompakcji);
- Faza II – faza odkształceń sprężystych, liniowych;
- Faza III – faza nieliniowości odkształceń obwodowych przy liniowym przebiegu odkształceń osiowych, świadcząca o pojawieniu się inicjalnych mikrospękań rozpoczynających proces pękania stabilnego;
- Faza IV – faza nieliniowości wszystkich charakterystyk deformacji, świadcząca o rozwoju pękania stabilnego;
- Faza V – faza nieliniowości wszystkich charakterystyk deformacji związana z pękaniem niestabilnym.

Można również wyróżnić fazę VI, która dotyczy pękania niestabilnego i rozpadu skały (Tajduś i in., 2012).

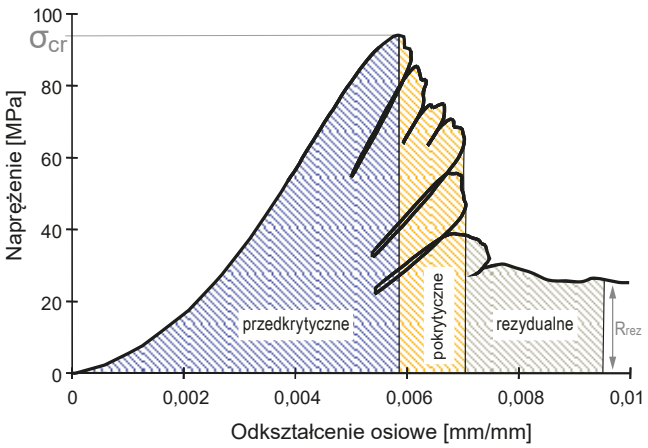
Fazy deformacji wyznaczają następujące graniczne wielkości naprężeń (wartości progowe) odpowiadające za stopień destrukcji materiału skalnego (Pinińska, 1994, 1996, 1999, 2003, 2017; Pinińska, Dziedzic, 2006; Domonik, 2012a; Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013) (rys. 67b):

- $\sigma_{I/II}$ – granica kompakcji;
- $\sigma_{II/III}$ – granica dylatancji względnej (mikrodylatancji), początek rozwoju inicjalnego pękania (pękanie stabilne);
- $\sigma_{III/IV}$ – granica liniowości odkształceń osiowych (pękanie stabilne);
- $\sigma_{IV/V}$ – granica dylatancji właściwej (makrodylatancji – pękanie niestabilne);
- $\sigma_{I/cr}$ – granica maksymalnej wartości naprężenia, po którym następują fazy pękania pozniszczeniowego.



Rys. 67. Krzywe deformacji opisujące przebieg deformacji osiowych, obwodowych, objętościowych

a – pełny, przedkrytyczny i pokrytyczny przebieg deformacji, **b**– schemat faz deformacji stanu przedkrytycznego (wg Hallbauera i in., 1973 za Pinińska, 2017)



Rys. 68. Przebieg deformacji przedkrytycznych, pokrytyczny i rezydualnych na podstawie odkształceń osiowych (Pinińska, 2000b)

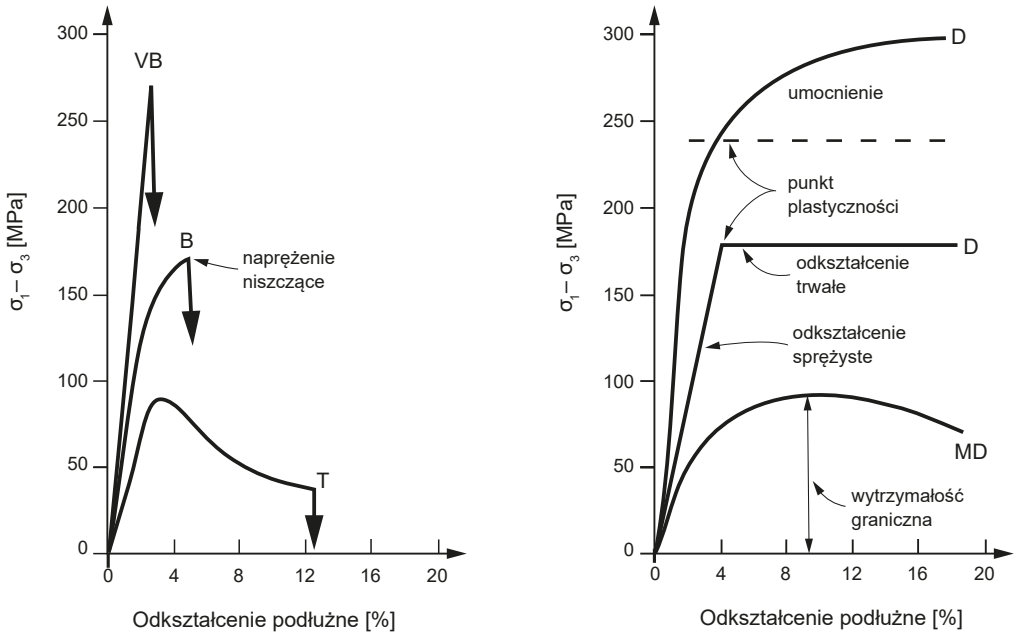
Poniszczeniowe (pokrytyczne) fazy deformacji nawiązuje się do czterech modeli deformacji pokrytycznej wg Pinińskiej (1992). Poniszczeniowe (pokrytyczne) modele deformacji wskazują czy badana skała ulega nagłej dezintegracji w jednej fazie (model I), czy niszczenie następuje stopniowo (model II, III lub IV). Przy niszczeniu stopniowym może wystąpić kilka faz głównych (fg) wywołanych makropękaniem, na które składają się pojedyncze fazy mikropękania (fi). Modele deformacji pokrytycznej wskazują również jak przebieg deformacji wpływa na wartość wytrzymałości rezydualnej oraz na zmiany modułu deformacji (Domonik, 2012a).

Na podstawie kształtu krzywej naprężenie (σ)–odkształcenie (ε) można wyróżnić skały odkształcające się bardzo krucho (VB), krucho (B), przejściowo (T), umiarkowanie ciągliwie (MD) oraz ciągliwie bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem (D) (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013) (rys. 69).

Badania wytrzymałościowo-odkształceniowe są wykorzystywane do analizy procesu pękania. Ocena procesu pękania materiału skalnego jest dokonywana na podstawie ścieżek deformacji uzyskanych w warunkach ściskania jedno- lub trójosiowego w połączeniu z zapisem przebiegu emisji akustycznej oraz w kompilacji z obrazami mikroskopowymi płytek cienkich wykonanych na materiale zniszczonym (Domonik, 2012b). Do zniszczenia struktury skalnej niezbędne jest zaistnienie określonej, krytycznej liczby spękań, którą można ustalić za pomocą emisji akustycznej, monitorując poszczególne sygnały pękania synchronicznie ze ścieżką obciążenia (Łukaszewski, 2002, Poszytek i in., 2021). Na tej podstawie można określić liczbę spękań wywołującą stan krytyczny lub finalne zniszczenie struktury skalnej (rys. 70). Na podstawie liczby zliczeń emisji akustycznej można także wykazać dlaczego skały drobnoziarniste są bardziej wytrzymałe niż gruboziarniste (Napier, Peirce, 1995). Do zniszczenia większej liczby ziaren materiału drobnoziarnistego o tej samej objętości potrzebna jest bowiem większa ilość spękań niż w materiale gruboziarnistym (Pinińska, 2017).

Powyższe przykłady wskazują ścisły związek geologicznych cech skały z charakterystyką wytrzymałościowo-odkształceniową określonych typów genetycznych (Łukaszewski, 2007; Wilczyński i in., 2021). Model emisji akustycznej jest powiązany z modelem deformacji. Zależności te można opisać empirycznie za pomocą czterech typów modeli deformacji w funkcji naprężenie (σ)/odkształcenie osiowe (ε_z) oraz modeli emisji akustycznej EA (Boyce i in., 1981; Pinińska, 1992, 2017) (rys. 71).

W procesie deformacji można wydzielić kilka faz emisji akustycznej przedkrytycznej towarzyszącej odkształcaniu



Rys. 69. Charakterystyczne krzywe naprężenie–odkształcenie w zależności od sposobu odkształcania się skał (na podstawie Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)

się próbki skalnej (Fonseka i in., 1985 i Kwaśniewski, 1992 za Domonik, 2012a):

– Faza A – szybki wzrost tempa emisji;
– Faza B – spadek tempa emisji;
– Faza C – okres względnej ciszy w przedziale naprężeń 25–75% wytrzymałości granicznej;
– Faza D – kolejne pojawienie się sygnałów emisji narastających wykładniczo w miarę wzrostu naprężenia i odkształcenia;
– Faza E – bardzo wysokie tempo generowania sygnałów emisji, kulminacją tego etapu jest przekroczenie wytrzymałości granicznej i zniszczenie finalne próbki.

Dwie pierwsze fazy (A i B) są związane z zamykaniem korzystnie zorientowanych mikroszczelin oraz poślizgiem ścianek tych mikrodefektów względem siebie. Faza C odpowiada quasi-sprężystemu, wolnemu od mikropękania i istotnych deformacji plastycznych, odkształcaniu się skały. U progu fazy D zostaje zainicjowany proces mikropękania. Postępuje on w miarę zwiększania obciążenia coraz intensywniej i powyżej progu dylatancji bezwzględnej kończy się w fazie E zniszczeniem materiału (Domonik, 2012a).

Na podstawie charakterystyki przebiegu procesu deformacji w zależności od występowania poszczególnych faz AE wyróżniono cztery modele (typy) emisji akustycznej (AE) stanu przedkrytycznego (Boyce i in., 1981; Łukaszewski, 1996 za Domonik, 2012a) (rys. 71b):

– model typu I – tzw. typ Mogiego, charakteryzuje się występowaniem fazy zamknięcia, fazy sprężystości, fazy pękania stabilnego i fazy pękania niestabilnego;
– model typu II – w odróżnieniu od typu I jest pozbawiony fazy pękania stabilnego, po fazie odkształceń sprężystych następuje bezpośrednio faza pękania niestabilnego;
– model typu III – analogiczny do typu I, ale brak w nim fazy zamknięcia;
– model typu IV – charakteryzuje się występowaniem tylko fazy zachowań sprężystych i fazy pękania niestabilnego.

Stadium pokrytyczne, zgodnie z podziałem Pinińskiej, zostało opisane trzema modelami (typami) emisji akustycznej (Pinińska, 1992; Pinińska, Łukaszewski, 1992 za Domonik, 2012a) (rys. 71c):

– model typu H (*high*) – charakteryzuje wysoki poziom emisji akustycznej przez cały czas trwania deformacji; emisja ma charakter oscylacyjny, związany z gwałtownym i konsekwentnym niszczeniem struktury materiału skalnego;
– model typu M (*medium*) – charakteryzuje się początkową ciszą akustyczną i wzmożoną emisją sygnałów w końcowym etapie niszczenia więzi skały;
– model typu L (*low*) – charakteryzuje zanikający ciąg sygnałów emisji akustycznej; największa liczba zliczeń pojawia się na początkowym etapie deformacji i maleje wraz z postępującą deformacją.

3.6.3.2.1. Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie próbek nieforemnych (test punktowego obciążenia)

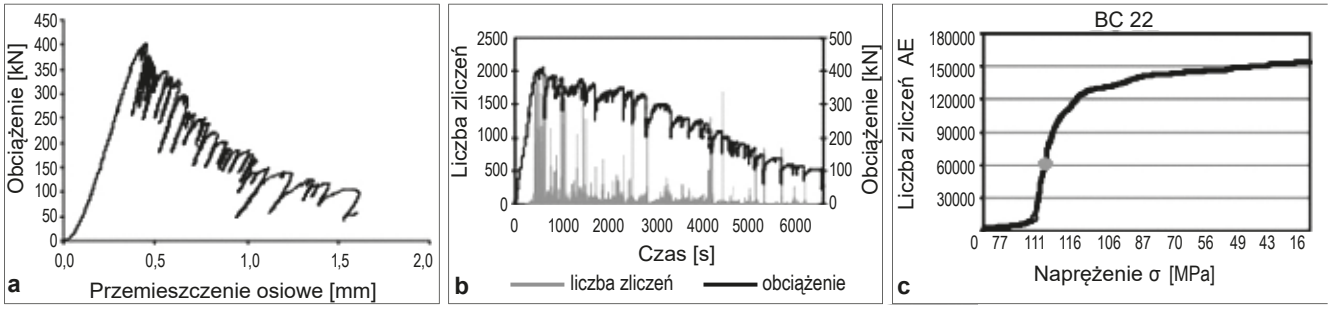
Warunki laboratoryjne przy badaniach wytrzymałościowych skał różnią się od warunków panujących w naturalnym środowisku, w którym skała występuje – przy wydobyciu, transporcie i obróbce próbek może dojść do zmiany wilgotności, odprężenia czy dezintegracji. Przydatnym badaniem jest więc test wytrzymałości pod obciążeniem punktowym, który można wykonać w warunkach terenowych. Próbki do badań mogą mieć kształt nieregularny (wtedy należy wykonać min. 20 badań wg normy ASTM D5731 lub min. 10 wg PN-EN 1997) lub regularny (min. 10 badań wg ASTM D5731). Do pomiaru jest wykorzystywana ręczna, przenośna prasa hydrauliczna zadająca obciążenie.

Wytrzymałość na obciążenie punktowe wylicza się na podstawie stosunku maksymalnej siły (nośności granicznej próbki przy obciążeniu punktowym) do kwadratu odległości pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie. Wyznacza się ją obliczeniowo:

$$I_S = \frac{F_{max}}{D_e^2}$$

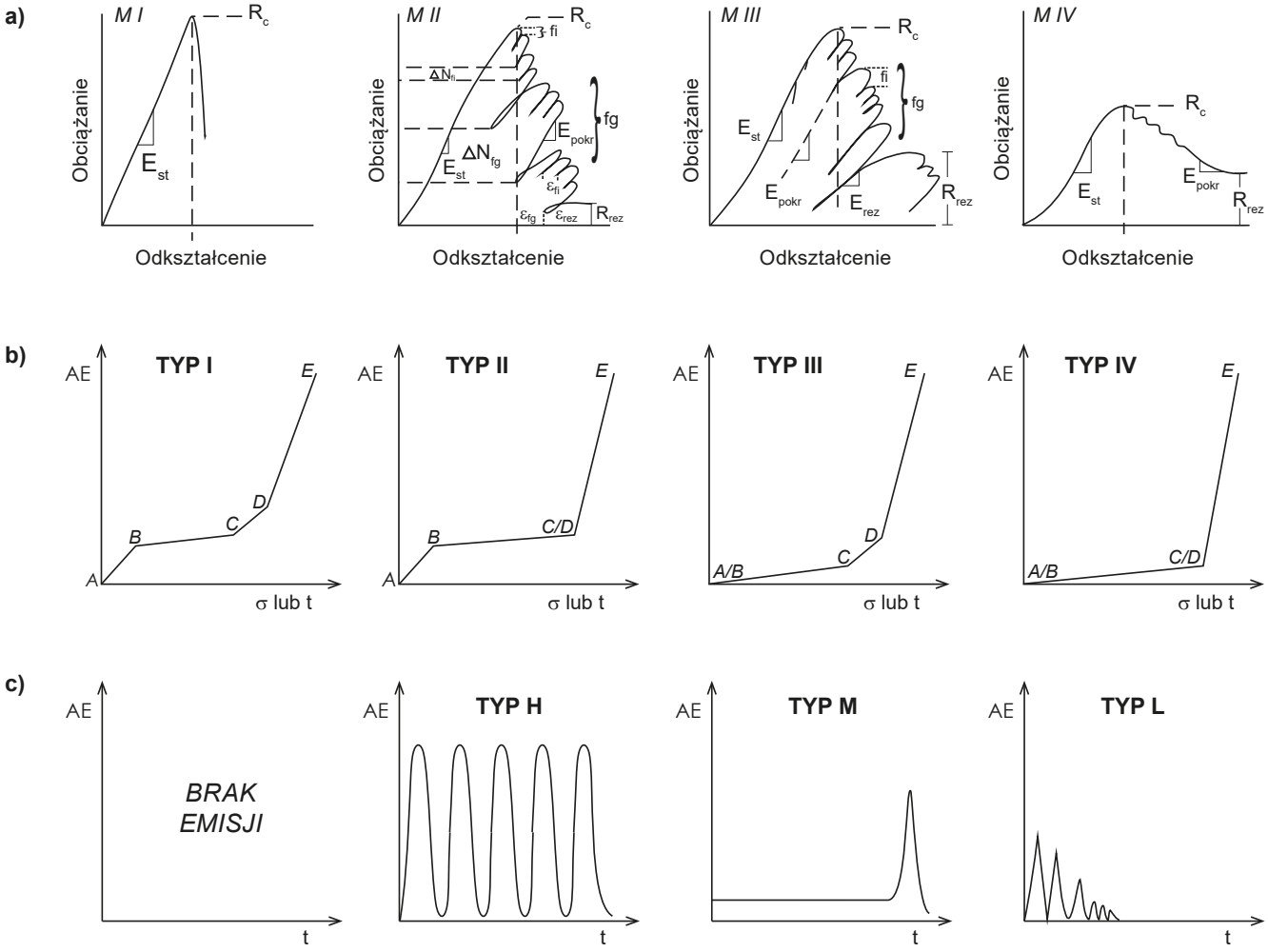
gdzie:

I_S – wytrzymałość na obciążenie punktowe [MPa],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
D_e^2 – kwadrat odległości pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie [mm^2].



Rys. 70. Efekty pękania w piaskowcu kwarcowym

a – efekty pękania intragranularnego z widocznymi pętlami histerezy na krzywej odkształceń osiowych, **b** – synchroniczne sygnały emisji akustycznej; **c** – krzywa sumacyjna sygnałów emisji akustycznej w funkcji naprężenia (stan krytyczny 60 000 sygnałów) (Pinińska, 2017)



Rys. 71. Modele deformacji skał oraz typy emisji akustycznej (AE)

a – modele deformacji przedkrytycznej i pokrytycznej wg Pinińskiej (1992), **b** – modele emisji akustycznej (AE) stanu przedkrytycznego wg Boyce'a i in. (1981), **c** – modele emisji akustycznej (AE) stanu pokrytycznego

W przypadku, gdy próbka ma kształt walca:

$$D_e^2 = D^2$$

gdzie:

D_e^2 – kwadrat odległości pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie [mm^2],

D^2 – kwadrat średnicy próbki walcowej [mm^2].

W sytuacji, gdy próbka jest nieforemna:

$$D_e^2 = \frac{4A}{\Pi}$$

gdzie:

D_e^2 – kwadrat odległości pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie [mm^2],

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki [mm^2].

Jeżeli średnica próbki odbiega znacząco od wartości 50 mm stosuje się współczynnik korekcyjny:

$$I_{s(50)} = C \cdot I_s$$

gdzie:

$I_{s(50)}$ – skorygowana wytrzymałość na obciążenie punktowe [MPa],

C – wskaźnik korygujący do średnicy 50 mm [–],

I_s – wytrzymałość na obciążenie punktowe [MPa].

Wskaźnik korekcyjny należy wyliczyć lub wykreślić z formuły:

$$C = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45}$$

gdzie:

C – wskaźnik korygujący do średnicy 50 mm [–],

D_e – odległość pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie [mm].

Badanie pod obciążeniem punktowym jest badaniem wskaźnikowym, zaleca się w każdym przypadku skorelować wyniki wytrzymałości punktowej z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie Rc.

3.6.3.2.2. Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określa maksymalne naprężenie pionowe, uzyskane podczas badania ściskania (PN-EN 1926; PN-EN 1997-2; ASTM D7012; instrukcje ISRM).

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (Rc) w jednoosiowym stanie naprężenia jest wyliczana jako iloraz maksymalnego obciążenia przenoszonego na powierzchnię próbki:

$$\mathrm{Rc} = \frac{F_{max}}{\mathrm{A}}$$

gdzie:

Rc – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [MPa],

F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki [mm^2].

Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie służą do ustalenia maksymalnej wartości naprężenia, jakiemu próbka skalna może się przeciwstawić pod wpływem działania obciążenia osiowego. Badania jednoosiowego ściskania powinny być wykonywane na próbkach regularnych o kształcie cylindrycznym, powierzchniach gładkich i wzajemnie równoległych i smukłości 2. Wskazane jest, żeby średnica próbki wynosiła ok. 50 mm, a w innych przypadkach należy mieć na uwadze, aby średnica największego ziarna w skale, na którego płaską powierzchnię wywierane jest obciążenie osiowe, nie przekraczała 1/10 średnicy walca.

Podczas obciążania powinny być analizowane odkształcenia osiowe oraz poprzeczne. W zależności od wstępnej oceny makroskopowej skał, do oceny odkształceń stosowane są tensometry lub ekstensometry. W przypadku oceny odkształceń w skałach łupkowych bardziej zasadne jest analizowanie odkształceń poprzecznych przy użyciu tensometrów umieszczanych na próbce z uwzględnieniem tekstury skał.

Wilgotność próbki ma zasadniczy wpływ na wyniki badania i należy dążyć do zachowania warunków naturalnych. Wszystkie odstępstwa warunków badania od naturalnego stanu wilgotności w jakim próbka była pobrana należy zarejestrować. Szczególne znaczenie ogrywa to w odniesieniu do skał zawierających substancje ilaste. Próbki należy badać w grupach, zgodnie z wydzielonymi odmianami litologicznymi lub specjalistycznymi taksonami, a liczba próbek w każdej grupie nie powinna być mniejsza niż 6.

Badanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie może być prowadzone ze stałą prędkością: obciążania (a), przesuwu tłoka (b), odkształcenia osiowego (c), odkształcenia obwodowego (d) (Pinińska, 1995) (rys. 72).

Rodzaj badania należy dobierać w zależności od celu badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

3.6.3.2.3. Wyznaczanie statycznych parametrów sprężystości

Badania sprężystości mają na celu określenia statycznych parametrów sprężystości próbek skał. Podstawą wyznaczania parametrów sprężystości są rejestrowane przez system akwizycji danych obciążenia i odkształcenia.

Niektóre programy firmowe wykorzystywane w badaniach geomechanicznych zawierają moduły przystosowane do wyznaczania głównych parametrów sprężystości: modułu Younga (E_{st}) i współczynnika Poissona (v_{st}) oraz maksymalnej wartości naprężenia osiowego (σ_{max}). Przy małej znajomości cech badanego ośrodka skalnego, do tak uzyskanych wyników należy podchodzić z dużą ostrożnością, gdyż charakteryzują przebieg procesu deformacji w arbitralnie zadeklarowanych punktach, które mogą nie być dostosowane do specyfiki materiału.

Na podstawie uzyskanych z badań wytrzymałościowych ścieżek deformacji są ustalane wartości modułu Younga (E_{st}) oraz współczynnika Poissona (v_{st}), a na ich podstawie wyliczane pośrednio, bazując na zasadach teorii sprężystości, pozostałe stałe: moduł ścinania (G_{st}), moduł Helmholtza (K_{st}) oraz stała Lamégo (L_{st}) wg następujących zależności (Hobler, 1977; Ulusay, Hudson, 2007; Pinińska, 2011; Ulusay, 2014):

$$E_{st} = \frac{9\mathrm{K_{st}} \cdot \mathrm{G_{st}}}{3\mathrm{K_{st}} + \mathrm{G_{st}}} = \frac{\mathrm{G_{st}} \cdot (3\mathrm{L_{st}} + 2\mathrm{G_{st}})}{\mathrm{L_{st}} + \mathrm{G_{st}}} = 2\mathrm{G_{st}} \cdot (1 + v_{st}) =$$

$$= \frac{\mathrm{L_{st}} \cdot (1 + v_{st})\,(1 - 2v_{st})}{v_{st}} = 3\mathrm{K_{st}}\,(1 - 2v_{st})$$

$$v_{st} = \frac{\mathrm{L_{st}}}{2(\mathrm{L_{st}} + \mathrm{G_{st}})} = \frac{\mathrm{L_{st}}}{3\mathrm{K_{st}} - \mathrm{L_{st}}} = \frac{E_{st}}{2\mathrm{G_{st}}} - 1 = \frac{3\mathrm{K_{st}} - E_{st}}{6\mathrm{K_{st}}} = \frac{3\mathrm{K_{st}} - 2\mathrm{G_{st}}}{2(3\mathrm{K_{st}} + \mathrm{G_{st}})}$$

$$\mathrm{G_{st}} = \frac{3}{2}\,(\mathrm{K_{st}} - \mathrm{L_{st}}) = \frac{3\mathrm{K_{st}} \cdot E_{st}}{9\mathrm{K_{st}} - E_{st}} = \frac{3\mathrm{K_{st}} \cdot (1 - 2v_{st})}{2(1 + v_{st})} =$$

$$= \frac{\mathrm{L_{st}} \cdot (1 - 2v_{st})}{2v_{st}} = \frac{E_{st}}{2(1 + v_{st})}$$

$$\mathrm{K} = \mathrm{L_{st}} + \frac{2}{3}\,\mathrm{G_{st}} = \frac{\mathrm{G_{st}} \cdot E_{st}}{3(3\mathrm{G_{st}} - E_{st})} = \frac{2\mathrm{G_{st}} \cdot (1 + v_{st})}{3(1 - 2v_{st})} =$$

$$= \frac{\mathrm{L_{st}} \cdot (1 + v_{st})}{3v_{st}} = \frac{E_{st}}{3(1 - 2v_{st})}$$

$$\mathrm{L_{st}} = \mathrm{K_{st}} - \frac{2}{3}\,\mathrm{G_{st}} = \frac{\mathrm{G_{st}} \cdot (E_{st} - 2\mathrm{G_{st}})}{3\mathrm{G_{st}} - E_{st}} = \frac{2\mathrm{G_{st}} \cdot v_{st}}{1 - 2v_{st}} =$$

$$= \frac{E_{st} \cdot \mathrm{K_{st}} \cdot v_{st}}{1 + v_{st}} = \frac{E_{st} \cdot v_{st}}{(1 - 2v_{st})\,(1 + v_{st})}$$

gdzie:

E_{st} – statyczny moduł Younga (moduł odkształcenia osiowego) [MPa],

v_{st} – statyczny współczynnik Poissona [–],

G_{st} – statyczny moduł ścinania (moduł odkształcenia postaciowego) [MPa],

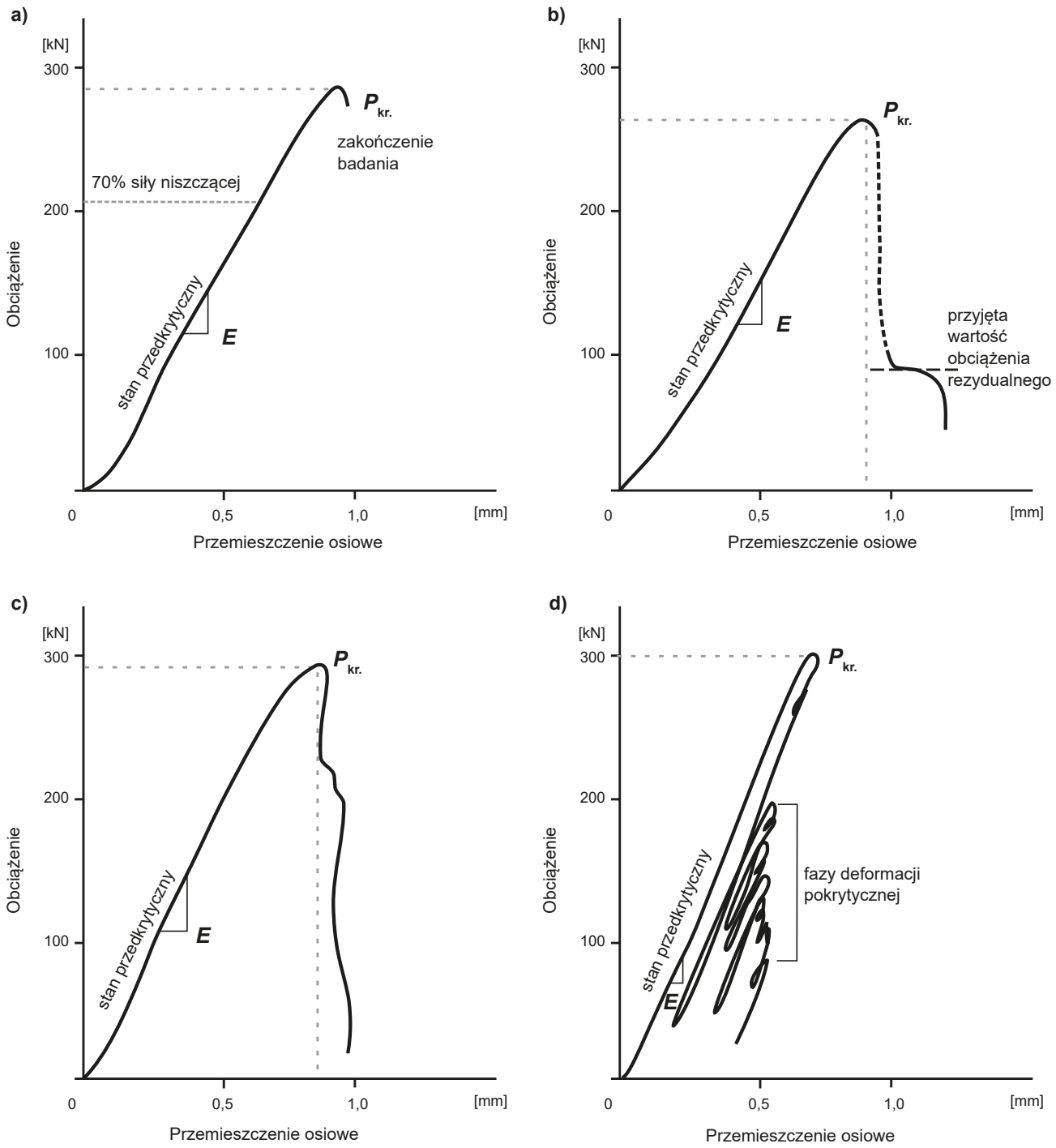
K_{st} – statyczny moduł Helmholtza (moduł odkształcenia objętościowego) [MPa],

L_{st} – statyczna stała Lamégo [MPa].

Moduł Younga (moduł odkształcenia osiowego) (E_{st})

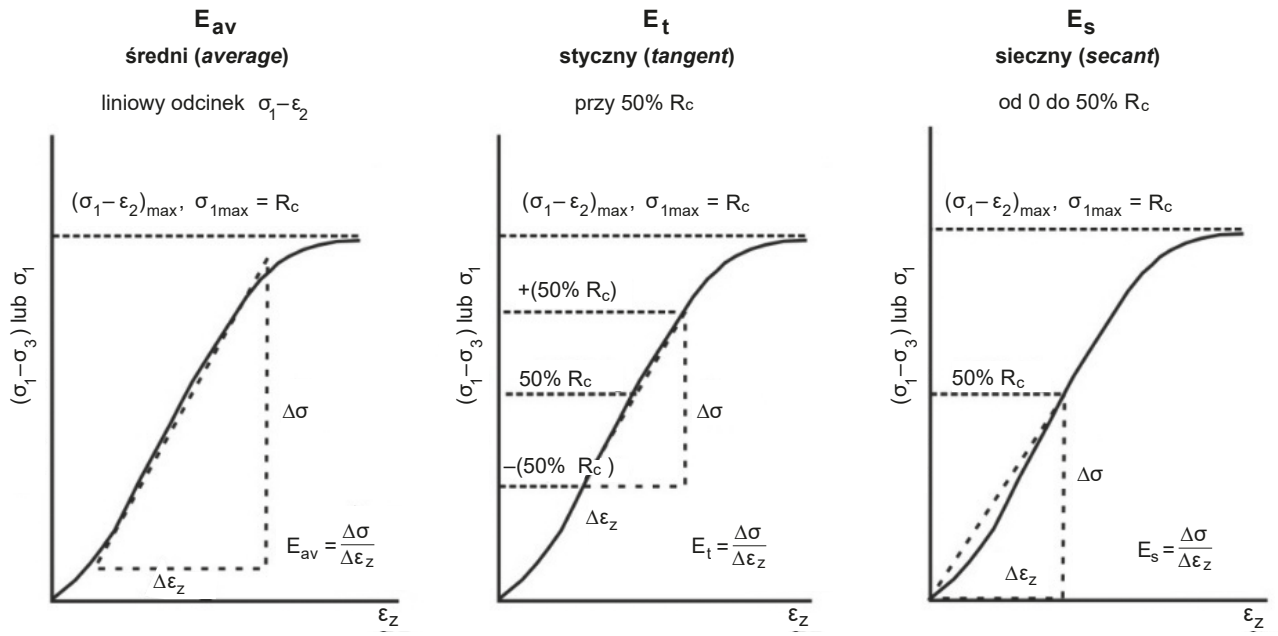
W zaleceniach normowych (ASTM, instrukcje ISRM oraz Eurokod 7) są wskazane metody wyznaczania modułu Younga oraz współczynnika Poissona. Dobór metody jest uwarunkowany charakterem deformacji skały, wizualizowanej za pomocą krzywej naprężenie–odkształcenie. Na podstawie krzywej powszechnie wyznacza się **moduł Younga** jako (rys. 73):

– **moduł średni** (*average* – E_{av}) wyrażony zależnością między naprężeniem krytycznym (σ_{cr}) lub naprężeniem



Rys. 72. Przykłady typowych charakterystyk deformacji (obciążenie/przemieszczenie osiowe) uzyskiwanych z badań wytrzymałościowych z zastosowaniem różnych programów sterowania ze stałą prędkością

a – obciążania, **b** – przesuwu tłoka, **c** – odkształcenia osiowego, **d** – odkształcenia obwodowego (Pinińska, 1995; Łukaszewski, 2013)



Rys. 73. Metody wyznaczania modułu Younga
(Ulusay, Hudson, 2007; Łukaszewski, 2013, zmienione; Ulusay, 2014)

różnicowym (σ_1–σ_3) a odkształceniami osiowymi (ε_z) na odcinku prostoliniowym krzywej naprężenie–odkształcenie osiowe (ε_z) zwykle między 20 a 80% naprężenia niszczącego;

– **moduł styczny** (*tangent* – E_t) wyrażony zależnością między naprężeniem krytycznym (σ_{cr}) lub naprężeniem różnicowym (σ_1–σ_3) a odkształceniami osiowymi (ε_z) na odcinku 25–75% maksymalnej wartości naprężenia, zwykle ok.50 % naprężenia niszczącego;

– **moduł sieczny** (*secant* – E_s) wyrażony zależnością między naprężeniem krytycznym (σ_{cr}) lub naprężeniem różnicowym (σ_1–σ_3) a odkształceniami osiowymi (ε_z) na odcinku 0–50% maksymalnej wartości naprężenia, najczęściej do 50% naprężenia niszczącego.

Współczynnik Poissona (*v*)

Współczynnik Poissona powinien być wyznaczany w zakresie pełnej liniowości wszystkich charakterystyk deformacji, gdyż zakres ten najbardziej odpowiada założeniom teoretycznym. Nie popełnia się wtedy niedokładności wynikającej z uwzględnienia wartości współczynnika Poissona spoza zakresu sprężystego. Spełnione są wtedy również ogólne wskazania ASTM i instrukcji ISRM, by ocenę odnosić każdorazowo do indywidualnego zachowania próbki skalnej.

Współczynnik Poissona[51] (*v*) w badaniach geomechanicznych jest definiowany jako zależność (iloraz) między wielkością obwodowych (ε_{xy}) do odkształceń osiowych (ε_z). Zatem zgodnie z zaleceniami ASTM i instrukcjami ISRM jest określany jako:

– styczny współczynnik Poissona (*tangent* – v_t);
– średni współczynnik Poissona (*average* – v_{av}).

[51] Współczynnik Poissona klasycznie jest definiowany jako stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego.

Zaleca się jednak sprawdzenie na krzywych deformacji czy współczynnik Poissona jest wyznaczany w zakresie pełnej liniowości wszystkich charakterystyk deformacji. Jeżeli bowiem skałę charakteryzuje względnie wysokie położenie progu pękania (makrodylatancji) zlokalizowanym średnio na poziomie ok. 70% maksymalnego naprężenia różnicowego ($\sigma_{1\,max}$–σ_3), to oznaczenia wartości modułu Younga średniego (*average* – E_{av}) oraz stycznego (*tangent* – E_t) są reprezentatywne, a wartość E_{av} odpowiada fenomenologicznie zakresowi odkształceń sprężystych (przed wystąpieniem kruchego pękania).

Jeżeli jednak skała charakteryzuję się niskim progiem pękania (makrodylatancji) a dużym przedziałem odkształceń wywołanych procesem kataklazy (pękanie stabilne), to zakres krzywej deformacji, na którym należy wyznaczać wartość modułu Younga oraz współczynnika Poissona musi być ustalony indywidualnie dla każdej próbki, dla odcinka, gdzie występuje liniowość wszystkich charakterystyk deformacji.

3.6.3.2.4. Badania wytrzymałościowe w warunkach trójosiowego ściskania

Badania wytrzymałościowe w warunkach trójosiowego ściskania, w tym próbek z dużych głębokości, powinny być wykonywane z zastosowaniem wielozadaniowego stanowiska badawczego z komorami ciśnieniowymi lub termociśnieniowymi, zestawione na bazie sztywnej prasy wytrzymałościowej, w której możliwa jest rejestracja zarówno parametrów stanu przedkrytycznego, jak i pokrytycznego (Łukaszewski, 2007; Dziedzic, Łukaszewski, 2011, 2015; Łukaszewski, 2013).

W badaniach wytrzymałościowych w warunkach trójosiowego ściskania głównym elementem stanowiska badawczego jest komora ciśnieniowa lub termociśnieniowa, w której na próbkę skalną wywierane jest ciśnienie okólne. Zależnie

od możliwości technicznych komory, zakresu obciążeń maszyny oraz możliwości grzewczych, można modelować warunki odpowiadające warunkom w górotworze do głębokości rzędu 5 km. Ważnym elementem badań w komorze ciśnieniowej jest możliwość umieszczenia w niej próbek skał o rozmiarach dochodzących do ok. 50 mm średnicy i wymaganej smukłości 2. Zapewnia to zmniejszenie *efektu skali*, co jest szczególnie ważne, gdy materiał jest uwarstwiony, anizotropowy, kawernisty lub spękany (mikrospękany).

Zgodnie z instrukcjami ISRM (Ulusay, Hudson, 2007), w zależności od ścieżki obciążenia, a w związku z tym od sposobu uzyskania obwiedni wytrzymałości, wyróżnia się trzy typy testów trójosiowego ściskania:

– pojedynczy test klasyczny, który przebiega w dwóch fazach: w pierwszej próbkę skalną poddaje się określonemu ciśnieniu okólnemu $P = \sigma_2 = \sigma_3$, w drugiej – obciąża się osiowo do zniszczenia (rys. 74a);
– test wielokrotnego zniszczenia (rys. 74b) jest bardziej skomplikowany i oprócz specjalnych wymagań sprzętowych powinien być wykonywany przez wykwalifikowanego operatora;
– test ciągłego zniszczenia przebiega w kilku fazach (rys. 74c) i jest najbardziej złożony i najtrudniejszy – wymaga zaawanasowanej aparatury badawczej, która umożliwia płynne sterowanie ciśnieniem okólnym w komorze.

Do podstawowych parametrów mechanicznych określanych w badaniach trójosiowego ściskania należą parametry sprężystości, wytrzymałość, spójność i kąt tarcia wewnętrznego.

Podczas badania konwencjonalnego próbek w komorze, umieszczone na nich czujniki pomiarowe rejestrują odkształcenia podłużne (ε_x) i poprzeczne ($\varepsilon_{x,y}$). Dzięki temu możliwe jest określenie wielkości odkształceń objętościowych (ε_v) będących wynikiem zmian wysokości walca (odkształcenia podłużne) oraz jego średnicy (odkształcenia poprzeczne). Rejestracja danych umożliwia ich wizualizację w postaci wszystkich charakterystyk odkształcenia w funkcji naprężenia i stwarza możliwość wyznaczenia faz deformacji. Na podstawie zależności naprężenie (σ)–odkształcenie (ε) wyznaczane są doświadczalnie (Łukaszewski, 2013), w odpowiednich zakresach liniowości odkształceń (sprężystych), wartości statycznych parametrów sprężystości: modułu Younga (E_{st}), współczynnika Poissona (ν_{st}) oraz stałe: moduł Helmholtza (K_{st}) i moduł ścinania (G_{st}) w warunkach wysokich ciśnień okólnych (rozdz. 3.6.3.2.3).

W badaniach trójosiowego ściskania wyznacza się wytrzymałość na ściskanie, która odpowiada maksymalnemu naprężeniu osiowemu (σ_{1max}) oraz spójność i kąta tarcia wewnętrznego na podstawie wykresu zależności τ–σ (rozdz. 3.6.3.2.3) przy uwzględnieniu klasycznego kryterium wytrzymałościowego Coulomba-Mohra (Coulomb, 1773) lub innego kryterium odpowiednio dobranego.

W trakcie badań można również prowadzić pomiary emisji akustycznej (rozdz. 3.6.3.2.4).

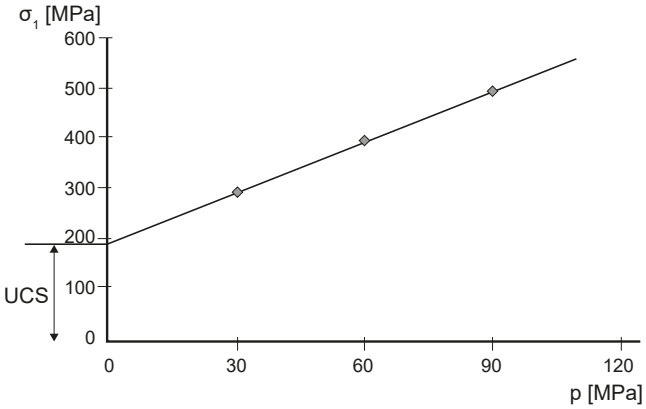
Badania pojedynczego zniszczenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania powinny być prowadzone na podstawie zaleceń normatywnych ASTM i instrukcji ISRM. Badania te wyznaczają precyzyjnie wartości modułu Younga (E_{st}), współczynnika Poissona (ν_{st}) oraz dla minimum trzech testów przy trzech równych ciśnieniach okólnych wartości spójności (c) i kąta tarcia wewnętrznego (φ).

Zaleca się prowadzenie badań wielokrotnego zniszczenia, które zwiększają precyzję oznaczeń parametrów sprężystych, gdyż są wykonywane dla tej samej litologii (próbki) dla różnych poziomów naprężenia. Również wartości UCS (*Unconfined Compression Strength*) można wyznaczać z zależności σ_1–p dla ciśnienia okólnego równego zero (rys. 75).

Pomiar odkształceń osiowych może być wykonany za pomocą klasycznych przetworników liniowych (LVDT) lub tensometrów oporowych zarówno dla próbek pionowych i poziomych. Pomiar odkształceń obwodowych na próbce pionowej może być wykonany za pomocą tensometrów oporowych lub standardowych ekstensometrów okalających próbkę. Natomiast pomiar odkształceń obwodowych na próbce poziomej musi zostać wykonany miejscowo, a nie na całym obwodzie próbki, gdyż pomiar standardowym ekstensometrem okalającym próbkę w materiale anizotropowym daje uśredniony po obwodzie cylindra pomiar współczynnika Poissona. Pomiar tych współczynników Poissona jest możliwy np. z wykorzystaniem tensometrów oporowych, przyklejonych na próbkę w odpowiedni sposób w relacji do warstwowania.

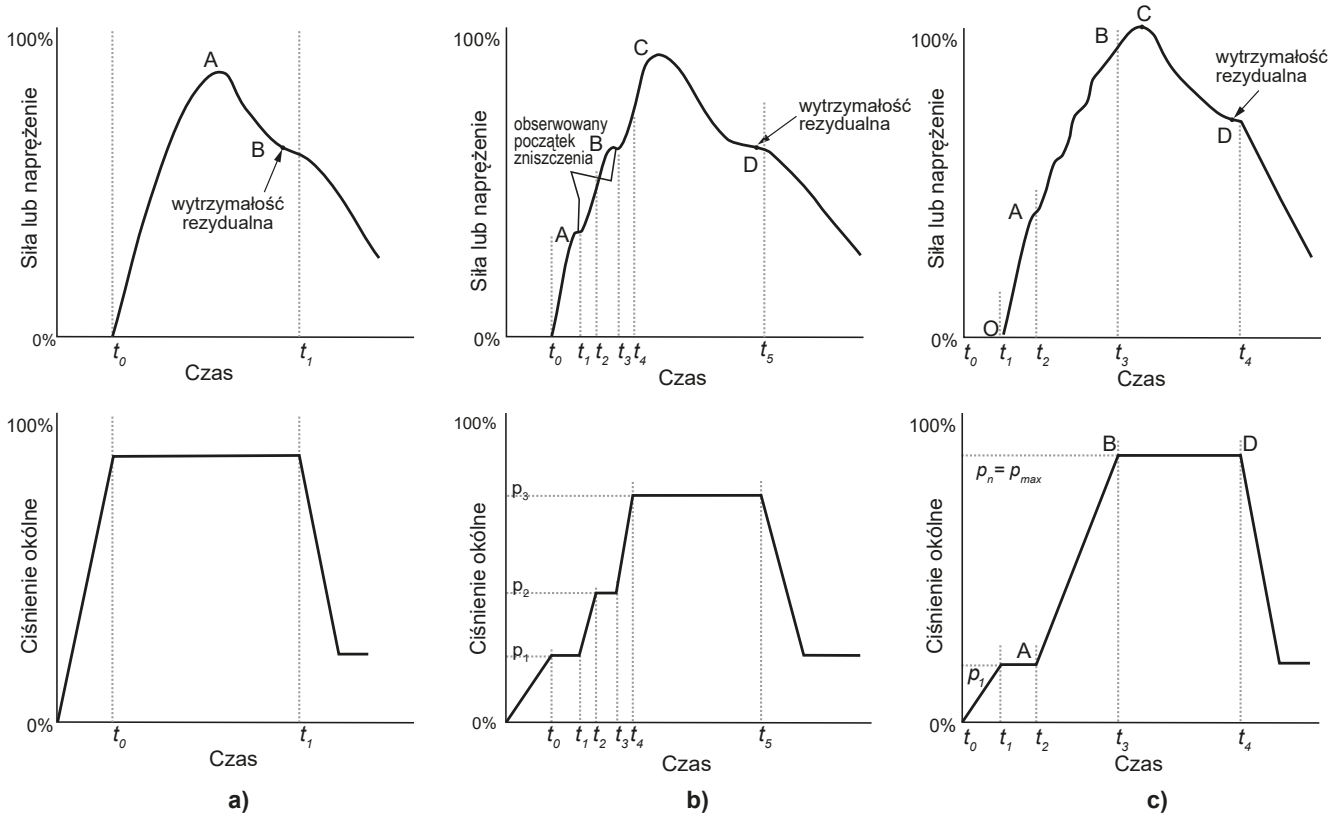
Badania parametrów sprężystych należy przeprowadzić w aparacie trójosiowym, dla łupków na próbach wyciętych w kierunku prostopadłym i równoległym względem laminacji z tych samych lamin. Jest to warunkiem scharakteryzowania anizotropii o symetrii VTI. Dla kolektorów piaszczystych bez makroskopowo widocznej laminacji próbki mogą być wycinane w jednym kierunku. Przy czym łatwiejszy do wycięcia jest zwykle walec pionowy, lecz większy sens geomechaniczny mają właściwości przy ściskaniu w poziomie. Jeżeli są wątpliwości co do izotropowości kolektora, można wykonać kilka testów na próbkach wyciętych w dwóch kierunkach.

Podczas badań wytrzymałościowych w warunkach trójosiowego ściskania mogą być prowadzone automatyczne pomiary prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej, co stanowi



Rys. 75. Graficzne przedstawienie wyników badań wielokrotnego zniszczenia na podstawie zależności σ1–p dla ciśnienia okólnego równego zero (Łukaszewski, 1996)

UCS – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (ang. *Unconfined Compression Strength*)



Rys. 74. Schematy testów trójosiowego ściskania

a – pojedynczy test klasyczny, **b** – test wielokrotnego zniszczenia, **c** – test ciągłego zniszczenia (Łukaszewski, 2013 wg Ulusay, Hudson, 2007)

przydatne narzędzie do analizy zmienności parametrów sprężystości ośrodków skalnych (Dziedzic, Łukaszewski, 2010) (rozdz. 3.6.3.1).

Badania prędkości fali ultradźwięków mają na celu określenie elementów dynamicznego tensora sztywności, a także zależności parametrów mechanicznych od np. zawartości minerałów ilastych, kerogenu, porowatości, wpływu ciśnienia otaczającego na prędkości fal i anizotropię. Dzięki wyznaczonym w laboratorium korelacjom pomiędzy parametrami petrofizycznymi a mechanicznymi możliwe jest precyzyjniejsze profilowanie własności mechanicznych na podstawie danych geofizycznych. Ponieważ sondami otworowymi i metodami sejsmicznymi są wyznaczane dynamiczne parametry sprężyste, dlatego ważne jest ustalenie ich relacji względem parametrów statycznych w laboratorium.

Mając na uwadze silne tłumienie fal ultradźwiękowych przez otwarte mikroszczeliny zaleca się wykonywanie pomiarów prędkości fali pod obciążeniem hydrostatycznym zbliżonym do efektywnego ciśnienia tektonicznego. Mierzyć należy falę podłużną i poprzeczną. Aby określić pięć parametrów sprężystych charakteryzujących anizotropowy ośrodek o symetrii VTI (uszczelnienie łupkowe) należy zmierzyć następujące prędkości fal: *Vp* (0º), *Vp* (90º), *Vp* (45º), *Vsh*, *Vsv*, gdzie w nawiasach podano kąt między kierunkiem propagacji a płaszczyzną warstwowania (izotropii), przy czym fala *Vsh* propaguje i oscyluje w płaszczyźnie poziomej, a fala *Vsv* oscyluje w płaszczyźnie pionowej przy poziomym lub pionowym kierunku propagacji. Z tego powodu, należy przygotować trzy próbki, wycięte pod różnymi kątami w stosunku do laminacji (0, 45, 90º).

Badania geomechaniczne w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Złożoność budowy geologicznej oraz stan naprężeń w skorupie ziemskiej powodują, że teoretyczny opis deformacji w górotworze jest bardzo uproszczony, a rezultaty badań otrzymane w jednych warunkach nie mają zastosowania w innych. Efekt wpływu wysokich ciśnień występujących w górotworze na właściwości materiału skalnego jest wynikiem złożonych procesów opisywanych zasadami mechaniki i termodynamiki, które obejmują jego sprężyste, niesprężyste i lepkie zachowanie. Ze względu na różnorodność tych opisów analizy teoretyczne w tym zakresie muszą być weryfikowane badaniami doświadczalnymi (Pinińska, 1980, 2011; Dziedzic, Łukaszewski, 2011).

Ważnym elementem wiarygodności badań głębokościowych jest możliwość równoczesnego wytworzenia w komorze wszechstronnego wysokiego ciśnienia oraz temperatury. Podwyższona temperatura wywołuje w ośrodku skalnym deformacje termiczne, których skutkiem może być wzrost lub relaksacja naprężeń, uplastycznienie lub utwardzenie skały, hydratyzacja lub dehydratyzacja, polimorficzne przeobrażenie minerałów, zmiany w przestrzennym układzie fazowym, wzrost lub zanik porów. Bez synchronicznego stosowania obciążenia oraz temperatury – wzajemne ich oddziaływanie na stan odkształcenia nie jest uwzględniane. Dzięki zastosowaniu dodatkowego systemu pomiarowego rejestracji prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej w trakcie

badań wytrzymałościowych w warunkach trójosiowego ściskania przy wysokich ciśnieniach i temperaturze możliwe jest także porównywanie uzyskiwanych danych z wynikami geofizycznych badań *in situ* (Dziedzic, Łukaszewski, 2010). W badaniach geomechanicznych prowadzonych w laboratorium w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury istotny jest dobór ciśnienia i temperatury w termociśnieniowej komorze badawczej.

Dobór ciśnienia w termociśnieniowej komorze badawczej (ciśnienie okólne $P = \sigma_2 = \sigma_3$). Wielkość ciśnienia okólnego ($P = \sigma_2 = \sigma_3$) w termociśnieniowej komorze badawczej, dla danego przedziału głębokości, powinna być dobrana na podstawie pomiarów otworowych i odpowiadać wartościom maksymalnego i minimalnego naprężenia poziomego (σ_{hmax}, σ_{hmin}) odzwierciedlającym rzeczywiste, lokalne naprężenia geostatyczne. Projektowany dla danej głębokości przedział wartości ciśnienia bocznego P w komorze ($P = \sigma_2 = \sigma_3$) powinien się zawierać w przedziale ciśnień σ_{hmax} lub σ_{hmin}, aby możliwe było skonstruowanie kół Mohra dla różnych ciśnień okólnych i wyznaczenie obwiedni wytrzymałościowej, a na jej podstawie stanu wytrzymałości granicznej oraz w miarę potrzeby określenia również parametrów wytrzymałości na ścinanie (τ), spójność (c) oraz kąta tarcia wewnętrznego (φ).

Po badaniach należy wybiórczo wykonać mikroskopowe analizy obrazu zniszczonego materiału skalnego w celu fenomenologicznej identyfikacji charakteru inicjacji pękania (intergranularny, intragranularny) oraz dokonać oznaczenia parametrów szorstkości na powierzchni zniszczenia.

Dobór temperatury w termociśnieniowej komorze badawczej (T). Temperatura stosowana podczas badań termociśnieniowych powinna być zgodna z rzeczywistym profilem termicznym otworu. Zmiany właściwości skał pod wpływem temperatury są nieodłącznym atrybutem badań na dużych głębokościach. Dlatego dane temperaturowe otworu są niezbędne przed rozpoczęciem badań geomechanicznych. Przy braku rzeczywistych danych z profilowania otworowego, temperaturę w komorze badawczej należy dobrać na podstawie średniego gradientu geotermicznego, poczynając od 9°C i dodanie wartości gradientu geotermicznego stosownie do głębokości lub wykorzystanie danych z profilu termicznego pobliskich otworów badawczych.

Spójność i kąt tarcia wewnętrznego, na podstawie wyników wytrzymałości na jednoosiowe i trójosiowe ściskanie, wyznacza się, bazując na wykresie zależności τ–σ przy uwzględnieniu klasycznego kryterium wytrzymałościowego Coulomba-Mohra. W zależności od zdefiniowania powierzchni zniszczenia oraz jednorodności skał, można stosować inne kryteria wytrzymałościowe np. Coulomba-Mohra zmodyfikowane, Burzyńskiego, Fairhursta, Hoeka-Browna, Hoeka-Browna rozszerzone, Jaegera, Bartona (Tajduś i in., 2012; Łukaszewski, 2013).

W przypadku kryterium wytrzymałościowego Coulomba-Mohra dla warunków dowolnego stanu naprężenia $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ obwiednia charakteryzująca warunki równowagi jest zbudowana na kołach Mohra o średnicy (σ_1–σ_3) (rys. 76) (Mohr, 1900; Łukaszewski, 2013 na podstawie Coulomb, 1779).

Parametry obwiedni uzyskuje się z badań laboratoryjnych wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na ściskanie w warunkach jednoosiowego oraz trójosiowego ściskania, dobranych do warunków panujących w górotworze na danej głębokości (rys. 77) (Mohr, 1900; Łukaszewski, 2013 na podstawie Coulomb, 1779).

Kryterium stateczności górotworu wyznaczane na drodze doświadczalnej oparte na kryterium wytrzymałościowym Coulomba-Mohra daje generalny obraz stanu krytycznego wizualizowany obwiednią wytrzymałościową (rys. 78).

Poprawne skonstruowanie obwiedni wytrzymałościowej wymaga zatem przeprowadzenia serii laboratoryjnych badań wytrzymałościowych w zróżnicowanym stanie naprężenia i odkształcenia oraz ustalenia krytycznej wartości naprężenia: na rozciąganie oraz ściskanie w jednoosiowym i trójosiowym stanie naprężenia.

3.6.3.2.5. Mechanizmy pękania[52]

W badaniach doświadczalnych, służących do oceny wytrzymałości i odkształcalności skał oraz klasyfikacji ich odporności na działanie obciążeń zewnętrznych istotne jest poznanie mechanizmów pękania przy uwzględnieniu czynników geologiczno-strukturalnych (Domonik, 2012a).

Podstawy badań dotyczących procesów pękania szczegółowo przedstawiono w wielu pozycjach literatury (Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b).

Badania procesów pękania zaleca się wykonywać w sztywnych prasach wytrzymałościowym, z ciągłym monitorowaniem procesu deformacji w stanach przedkrytycznych i pokrytycznych w połączeniu z pomiarami emisji akustycznej (AE). Dzięki jednoczesnym pomiarom możliwe jest (Domonik, 2012a):

- ustalenie zakresu całkowitej, globalnej (granicznej lub końcowego rozpadu) odporności na zniszczenie i ich energetycznego ekwiwalentu;
- wyznaczenie na ścieżce deformacji lub emisji akustycznej energii dowolnych etapów zniszczenia lub pojedynczych pęknięć;
- zliczanie poszczególnych śladów kumulacji i rozpraszania energii w celu ilościowej oceny krytycznej wartości spękań wywołującej utratę stabilności danego ośrodka (Mogi, 1977 i Malan, Napier, 1995 za Domonik, 2012a).

Emisja akustyczna to zjawisko dźwiękowe, przejawiające się wygenerowaniem fali sprężystej, która zanika w miarę oddalania się od źródła, wywołane gwałtownym wyzwoleniem energii zgromadzonej w materiale. W skałach emisja akustyczna jest dźwiękowym przejawem dezintegracji, niszczenia jej wewnętrznej struktury. Zjawisko emisji akustycznej jest użytecznym narzędziem do badania zachowania się

[52] Tekst na podstawie publikacji Domonik A. (red.), 2012a – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. VI. Centralne Karpaty Zachodnie. T. 13. Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI, Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 128.

skał pod obciążeniem w jedno- lub trójosiowym stanie naprężeń, zarówno w stanach przed-, jak i pokrytycznych. Emisja akustyczna jest wykorzystywana do oceny stanów granicznych w skałach i daje duże możliwości interpretacji ścieżki deformacji (Domonik, 2012a).

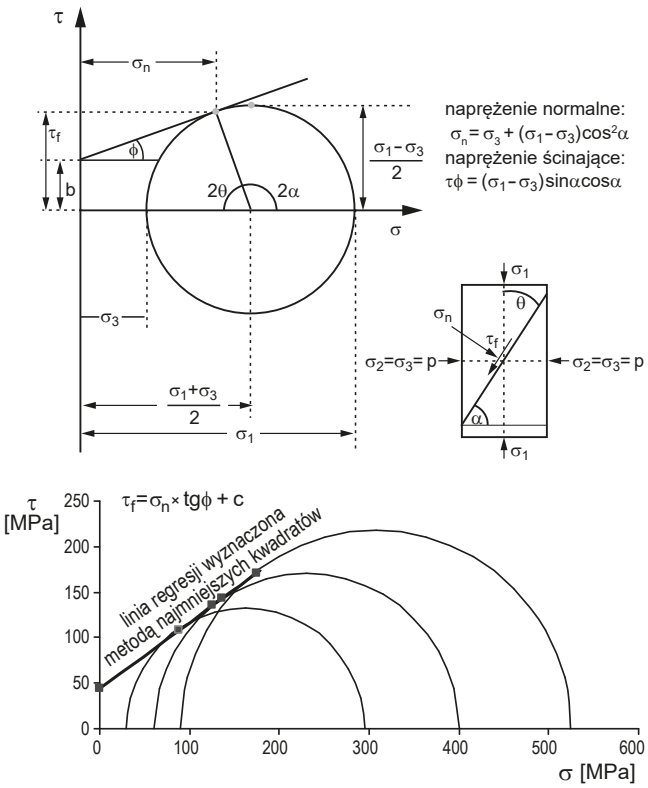
Przebieg emisji akustycznej podczas jednoosiowego ściskania nawiązuje do skokowego procesu deformacji. Jest on ściśle związany z budową wewnętrzną skały (strukturą i teksturą) oraz jej składem mineralnym. Szczególnie charakterystyczne przejawy skokowo-zmiennego przebiegu emisji akustycznej, uwarunkowane litologią, genezą oraz historią geologiczną skały, są bardzo wyraźne na pokrytycznej charakterystyce sygnałów AE. Dynamika niszczenia struktury wewnętrznej skały jest obserwowana w postaci zmiennych sekwencji paczek zdarzeń akustycznych lub jako cisza akustyczna. Na podstawie częstości i mocy impulsów akustycznych można wnioskować o dynamice mechanizmów destabilizujących strukturę skały (Domonik, 2012a).

Doświadczenia Pinińskiej (1999 za Domonik, 2012a) pokazują, że w skałach okruchowych i krystalicznych skałach magmowych głębinowych mikrospękania mają głównie charakter intragranularny, a proces niszczenia powtarza się cyklicznie na skutek kolejnego kruszenia pojedynczych ziaren. Pękanie ziaren wywołuje mikrorozdzielenie i relaksację naprężeń w materiale. Co jakiś czas, na skutek zgromadzenia większej porcji energii, następuje makrorelaksacja w wyniku makropękania. Charakterystyczny dla skał okruchowych i magmowych intragranularny mechanizm pękania powoduje skokowy rozpad skały, a odkształcenia w zakresie wytrzymałości rezydualnej są niewielkie.

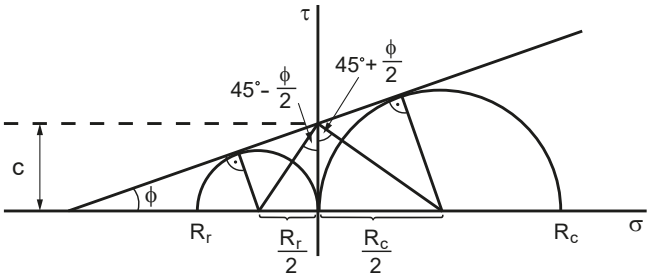
W skałach węglanowych mikropękanie ma głównie charakter międzyziarnowy i początkowo jest niszczony materiał spoiwa. Przy zaawansowanym rozpadzie silnie zaznaczają się wpływy odłamywania, przesuwania i kruszenia w strefie poślizgu, zatem dużą rolę odgrywają procesy tarcia na powierzchni odspojenia, które przebiegają nieregularnie i mają charakter losowy. Pękanie intergranularne, obserwowane w skałach węglanowych, zakończone efektem poślizgu wzdłuż strefy makrospękania przejawia się znacznymi przemieszczeniami w zakresie wytrzymałości rezydualnej (Pinińska, 1999 za Domonik, 2012a).

Zróżnicowane mechanizmy deformacji znajdują wyraźne odzwierciedlenie w przebiegu emisji akustycznej opisane za pomocą modeli emisji akustycznej (rozdz. 3.6.3.2, rys. 71).

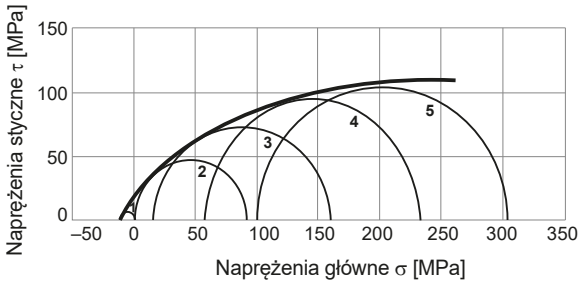
Występujące w skałach węglanowych, a wynikające ze składu mineralnego przesunięcia w strefach poślizgu i opory tarcia okruchów zwiększają, tuż przed całkowitym rozpadem materiału, wytrzymałość rezydualną przy równoczesnej, dużej aktywności akustycznej. Oznacza to, że energia gromadzona w skale jest zużywana na bieżąco, czego przejawem jest słaba emisja sygnałów fali akustycznej o zbliżonych amplitudach. Stąd dla typowych skał węglanowych charakterystycznym modelem emisji akustycznej jest model M. Tuż przed finalnym zniszczeniem próbki obserwuje się wtedy znaczący wzrost amplitudy sygnałów fali akustycznej, wyzwalanych na skutek przebudowy struktury materiału i przezwyciężeniem sił tarcia na powierzchniach deformowanych fragmentów (Pinińska, 1999 za Domonik, 2012a).



Rys. 76. Schemat wyznaczania kół Mohra i obwiedni Coulomba-Mohra (Mohr, 1900; Łukaszewski, 2013 na podstawie Coulomb, 1779)



Rys. 77. Zależności kątowe dla kół Mohra w zakresie naprężeń ścinających i rozciągających (Mohr, 1900; Łukaszewski, 2013 na podstawie Coulomb, 1779)



Rys. 78. Obwiednia wytrzymałościowa obrazująca krytyczny stan naprężeń w danej partii górotworu

1 – wytrzymałość na rozciąganie, 2 – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie; 3, 4, 5 – wytrzymałość w warunkach trójosiowego ściskania (Hobler, 1977; Mohr, 1900; Łukaszewski, 2013 zmienione na podstawie Coulomb, 1779)

Typowe skały klastyczne i magmowe zwykle charakteryzują cyklicznie występujące wzmożenia sygnałów emisji akustycznej o dużej amplitudzie, oddzielone nisko amplitudowymi sygnałami lub nawet chwilową ciszą akustyczną. Zachowanie takie opisuje model H. Ostateczna utrata wytrzymałości następuje gwałtownie, gdy liczba spękań struktury skały osiąga wartość krytyczną i nie występuje wcześniejsze ostrzeżenie, poprzez zmianę dystrybucji sygnałów, o chwili finalnego zniszczenia (Pinińska, 1999 za Domonik, 2012a).

Model emisji akustycznej jest powiązany z modelem deformacji (rozdz. 3.6.3.2, rys. 71). Na tej podstawie można powiązać modele krzywych deformacji oraz modele emisji akustycznej przedkrytycznej i pokrytycznej z typem litologicznym skały (Pinińska, 1995).

Skały osadowe klastyczne o spoiwie krzemionkowym, skały magmowe głębinowe, krystaliczne skały metamorficzne, a także mocne skały węglanowe deformują się zgodnie z modelem M II. Temu modelowi deformacji towarzyszy model H pokrytycznej emisji akustycznej, a zależnie od przebiegu fazy kompakcji, emisja typu I lub II w stanie przedkrytycznym (Pinińska, 2007).

Skały magmowe wylewne (andezyty) zachowują się podobnie do wytrzymałych skał węglanowych zawierających mocne klasty lub bioklasty. Na proces deformacji wpływ ma struktura holokrystaliczno-porfirowa, średnioziarnista, oraz tło skalne, które w większości jest o strukturze hyalopilitowej czy felsytowej. Andezyty wykazują trzeci model deformacji pokrytycznej (M III), a wpływ na to mają duże, hip- i automorficzne fenokryształy zatopione w masie bardzo drobnokrystaliczego ciasta skalnego, które zawiera także szkliwo wulkaniczne (Domonik, 2012a).

Skały węglanowe organodetrytyczne, z liczną zawartością szczątków organicznych, oraz skały metamorficzne o składzie węglanowym, a także osadowe skały okruchowe o spoiwie węglanowym zwykle zachowują się zgodnie z modelem deformacji M III oraz modelem L emisji pokrytycznej i IV modelem emisji przedkrytycznej (Domonik, 2012a).

Doświadczenia wskazują, że procesy utraty wytrzymałości, monitorowane na podstawie sygnałów emisji akustycznej, powinny być jednocześnie analizowane na tle mikroskopowych badań płytek cienkich, wyjaśniających dla danego typu litologicznego skały strukturalne uwarunkowania mechanizmów zniszczenia (Domonik, 2012a).

3.6.3.2.6. Badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie

Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie jest podstawową stałą materiałów skalnych i jednym z najważniejszych badań geomechanicznych przy dokumentowaniu warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. Badanie to pozwala na interpretację parametrów spójności i tarcia wewnętrznego w zakresie naprężeń rozciągających (rys. 77, rozdz. 3.6.3.2.3).

Badania rozciągające mogą powodować wiele trudności, wzorcowo celem powinno być uzyskanie czystego jednoosiowego stanu naprężeń (jak przy badaniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie), lecz o przeciwnym zwrocie działania sił. Ze względu na koncentrację naprężeń w miejscach przyłożenia sił rozciągających, a co za tym idzie pojawiania się sił zginających i skręcających, pożądany jednoosiowy stan naprężeń łatwo zaburzyć.

Ze względu na trudność badania proponowane są różne metody obciążania próbek skalnych. Próby rozciągania bezpośredniego są uważane za najbardziej miarodajne, ponieważ pole naprężeń próbki izotropowej jest określane bezpośrednio przez przyłożone obciążenie i warunki brzegowe, niezależnie od materiału, przy innych testach trzeba przyjąć założenie liniowej sprężystości przy równych modułach ściskania i rozciągania, co dla wielu skał jest błędnym założeniem (Luong, 1988).

Do próby rozciągania bezpośredniego można użyć próbek foremnych lub nieforemnych, mocowanych w różny sposób do siłowników maszyny wytrzymałościowej. Sposób zamocowania powinien zapewnić jednorodny rozkład naprężeń rozciągających. Wytrzymałość oblicza się zgodnie z wzorem:

$$\sigma_T = \frac{F_{max}}{S}$$

gdzie:
σ_T – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
S – pole przekroju poprzecznego próbki [mm^2].

Do wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie stosuje się również testy brazylijskie, czyli metodę poprzecznego ściskania polegającą na ściskaniu próbki po tworzącej. Wytrzymałość graniczna wyliczona tą metodą jest badana podczas poprzecznego ściskania próbek walcowych.

Obciążanie próbki wzdłuż tworzącej powoduje złożony stan naprężenia i wywołuje pęknięcie rozdzielcze próbki wzdłuż powierzchni przechodzącej przez podłużną oś walca. Metoda ta jest powszechnie stosowana, ze względu na swoją prostotę, a wytrzymałość na rozciąganie (R_r) jest określona zależnością:

$$R_r = \frac{2F_{max}}{\pi DH}$$

gdzie:
R_r – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
D – średnica próbki walcowej [mm],
H – wysokość próbki walcowej [mm].

W celu wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie metodą brazylijską zaleca się wykonywanie badań w warunkach ściskania po tworzącej (badania rozłupywania) z płaszczyzną zniszczenia poprzeczną do laminacji próbki.

Podczas obciążania próbki walcowej wzdłuż tworzącej powstaje złożony stan naprężenia, który wpływa na charakter pękania wzdłuż osi walca. Charakter powierzchni pękania (szorstki lub gładki) jest zależny od struktury materiału. Zatem kierunek rozciągania powinien być odpowiednio dobrany do celu badawczego.

Wyniki wytrzymałości na rozciąganie można wykorzystywać m.in. do określenia ciśnienia szczelinowania zarówno

warstw zbiornikowych, jak i uszczelnienia (Woźniak, Zawisza, 2011).

Spójność i kąt tarcia wewnętrznego, na podstawie wyników wytrzymałości na rozciąganie, wyznacza się na podstawie wykresu zależności τ–σ (rozdz. 3.6.3.2.3) przy uwzględnieniu klasycznego kryterium wytrzymałościowego Coulomba-Mohra lub innego kryterium odpowiednio dobranego.

Wytrzymałość na rozciąganie można określić również w procesie zginania przez obciążanie środka płaskiego krążka skały umieszczonego na podporze w kształcie pierścienia wzdłuż całej podstawy (Tajduś i in., 2012). Maksymalne naprężenia rozciągające oblicza się (Protodyakonov, 1962, 1969):

$$\sigma_T = \frac{3(1+\nu)F_{max}}{2\pi t^2}\left(\frac{1}{1+\nu} + \log\frac{r_d}{r_p} - \frac{1-\nu}{1+\nu}\frac{r_p^2}{4r_d}\right)$$

gdzie:

σ_T – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],
ν – współczynnik Poissona [–],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
t – grubość krążka [mm],
r_d – promień krążka [mm],
r_p – promień powierzchni poddanej równomiernemu obciążaniu [mm].

3.6.3.2.7. Badania wytrzymałości na ścinanie

Badania wytrzymałości na ścianie można przeprowadzać różnymi metodami, przy czym najczęściej są wykonywane metodą ścinania ze ściskaniem lub metodą ścinania prostego (bezpośredniego) (instrukcje ISRM; PN-G-04304; Hobler, 1977).

Badanie wytrzymałości na ścinanie ze ściskaniem wykonuje się w aparacie do maszyny wytrzymałościowej. Próbki są ścinane wzdłuż wymuszonej powierzchni pod kątem 30–70°, które są zawarte między płaszczyzna ścinania a pionowym kierunkiem działania siły obciążającej. Wyższy kąt może powodować ściskanie próbki, zamiast ścinania. Orientacja próbki w urządzeniu jest tak wybierana, żeby powierzchnia ścinania pokrywała się z powierzchnią osłabienia skały (nieciągłości, uwarstwienia, łupliwości). Do badań zazwyczaj są używane próbki z rdzeni wiertniczych o smukłości 1, w ilości min. pięć próbek jednego materiału skalnego.

Wartość naprężenia normalnego i naprężenia stycznego określa się na podstawie wzorów:

$$\sigma_n = \frac{F_{max}}{A}\sin\alpha$$

$$\tau = \frac{F_{max}}{A}\cos\alpha$$

gdzie:

σ_n – naprężenie normalne [MPa],
τ – naprężenie styczne [MPa],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
A – pole wymuszonej powierzchni ścinania [mm^2],
α – kąt między płaszczyzną ścinania a kierunkiem siły ściskającej [°].

Badania wytrzymałości na ścinanie proste (bezpośrednie) polega na obciążaniu próbki skały w kształcie krążka równomiernie rozłożoną siłą ścinającą. Badania prowadzi się w maszynie wytrzymałościowej umożliwiającej zadanie obciążenia ze stałą prędkością. W momencie ścięcia próbki odczytuje się siłę niszczącą i na tej podstawie oblicza wytrzymałość na ścinanie proste wg wzoru:

$$R_t = \frac{F_{max}}{\pi dh}$$

gdzie:

R_t – wytrzymałość na ścinanie [MPa],
F_{max} – wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki [N],
d – średnica tłoka [mm]
h – wysokość próbki [mm].

Na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie określa się wytrzymałość rezydualną na ścinanie oraz spójność i kąt tarcia wewnętrznego, który wyznacza się metodą graficzną z zależności τ–σ (Kidybiński, 1982 za Kidybiński, 2004).

3.6.3.2.8. Badania ściśliwości

Ważnym parametrem stosowanym w modelowaniu numerycznym jest ściśliwość, którą wyznacza się zarówno dla skał zbiornikowych, jak i dla skał uszczelnienia.

Ściśliwość skał jest związana z teorią poroelastyczności, która opisuje wpływ płynu, znajdującego się w porowatej skale, na jej właściwości, ponieważ obniżenie wartości ciśnienia wywieranego przez płyn wypełniający przestrzeń porową może prowadzić do wzrostu wartości naprężeń efektywnych, a więc doprowadzić do kompakcji skały i zmniejszenia porowatości (Cicha-Szot, 2018). Wpływ zmian ciśnienia porowego na odkształcalność skał jest istotnym parametrem przy modelowaniu numerycznym magazynów i składowisk. Całkowita ściśliwość skał C_t jest definiowana jako (Cicha-Szot, 2018):

$$C_t = S_o C_o + S_w C_w + S_g C_g + C_p$$

gdzie:

C_t – ściśliwość [1/Pa],
S_o – nasycenie ropą [–],
S_w – nasycenie wodą [–],
S_g – nasycenie gazem [–],
C_o – ściśliwość ropy[1/Pa],
C_w – ściśliwość wody [1/Pa],
C_g – ściśliwość gazu [1/Pa],
C_p – ściśliwość formacji złożowej [1/Pa].

W warunkach laboratoryjnych, w zależności od posiadanej aparatury, ściśliwość jest wyznaczana w symulowanych warunkach złożowych lub symulowanych warunkach eksploatacji (Cicha-Szot, 2018).

Modelowanie ściśliwości ośrodka powinno uwzględniać czynniki takie jak: ściśliwość objętościową (C_b) (oznacza względną zmianę objętości skały), ściśliwość ziarnową (C_g) (wyraża względną zmianę objętości ziaren) oraz ściśliwość przestrzeni porowej (C_p) (opisuje względną zmianę objętości

porowej). Wartości te otrzymuje się przy stałym ciśnieniu porowym lub stałym ciśnieniu nadkładu (Cicha-Szot, 2018).

Uwzględniając naprężenia nadkładu, ciśnienie porowe, a także gęstość objętościową i objętość porów, oblicza się cztery możliwe rodzaje parametrów ściśliwości (Zimmerman i in., 1991 za Schutjens, Heidug, 2012):

$$C_{bc} = \frac{1}{\rho_b}\left(\frac{\delta\rho_b}{\delta P_c}\right)_{P_p}$$

$$C_{bp} = \frac{1}{\rho_b}\left(\frac{\delta\rho_b}{\delta P_p}\right)_{P_c}$$

$$C_{pc} = \frac{1}{V_p}\left(\frac{\delta V_p}{\delta P_c}\right)_{P_p}$$

$$C_{pp} = \frac{1}{V_p}\left(\frac{\delta V_p}{\delta P_p}\right)_{P_c}$$

gdzie:

C_{bc} – zmiana objętości skały (ρ_b) pod wpływem ciśnienia nadkładu (P_c) przy stałym ciśnieniu porowym (P_p) [1/Pa],

C_{bp} – zmiana w objętości związana ze zmianą ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu uszczelnienia [1/Pa],

C_{pc} – zmiana w objętości porowej (V_p) wywołaną zmianą ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym [1/Pa],

C_{pp} – zmiana w objętości porowej wraz ze zmianą ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu [1/Pa],

P_c – naprężenia nadkładu [kPa],

P_p – ciśnienie porowe [kPa],

ρ_b – gęstość objętościowa [Mg/m^3],

V_p – objętość porów [ml].

Zagadnienia dotyczące ściśliwości wody i wodnych roztworów soli pod wpływem ciśnienia nie są dobrze rozpoznane. W literaturze polskojęzycznej trudno znaleźć pozycje dotyczące ściśliwości skał porowatych oraz wpływu tego parametru na wartości głównych parametrów petrofizycznych, jakimi są porowatość i przepuszczalność. Doświadczenia wskazują na konieczność przygotowania bazy ściśliwości skał zbiornikowych Europy Centralnej, na podstawie których możliwe byłoby wyprowadzenie modeli dla poszczególnych formacji, które pozwolą na zwiększenie dokładności symulacji produkcji oraz na dokładniejszą interpretację laboratoryjnych badań przepływów (Cicha-Szot, 2018).

3.6.3.2.9. Badania reologiczne

W badaniach odkształceniowych zwykle zakłada się sprężyste zachowanie skał i wyznacza kryteria wytrzymałości. Inne podejście przyjmuje się dla skał charakteryzujących się lepkimi właściwościami mechanicznymi. W przypadku oceny geomechanicznej tego typu skał istotne jest rozpoznanie pełzania i relaksacji. Szczególnie w przypadku oceny geomechanicznej łupków, iłowców ze znaczną zawartością substancji organicznej oraz masywów skalnych zbudowanych z soli.

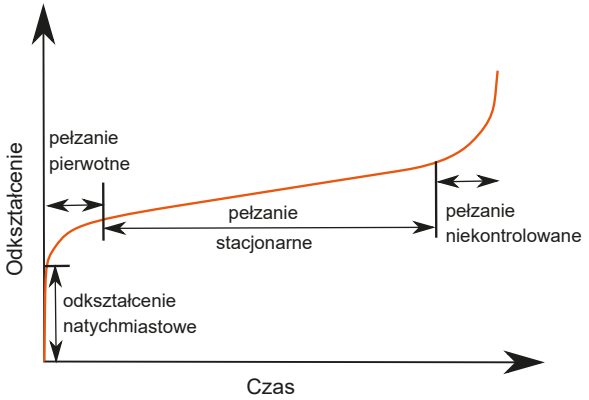
W przypadku wystąpienia w masywie skalnym skał podatnych na pełzanie oraz relaksację naprężenia, należy przeprowadzić badania laboratoryjne mające na celu określenie charakterystyk geomechanicznych pełzania skał i relaksacji, uwzględniając czas funkcjonowania projektowanego podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. Badanie pełzania polega na określeniu zależności odkształcenia w funkcji czasu przy stałym obciążaniu. Podczas badania relaksacji ustala się zależność zmiany naprężenia w czasie w funkcji czasu przy stałej wartości odkształcenia. W badaniach pełzania i relaksacji ustala się parametry reologiczne, m.in.: wskaźnik pełzania i czas relaksacji. Wskaźnik pełzania można wyznaczać jako stosunek przyrostu odkształceń mierzonych po określonym czasie od chwili pełnego obciążenia. Czas relaksacji wyznacza się z krzywej obciążenia w funkcji czasu przy stałym odkształceniu, jako długość odcinka wyznaczonego na osi czasu przez styczną do podanej funkcji (Hobler, 1977; Bażyński i in., 1999; Ulusay, Hudson, 2007; Tajduś i in., 2012; Ulusay, 2014).

W warunkach laboratoryjnych ocena procesu pełzania polega na obciążaniu próbki do poziomu projektowanego naprężenia, następnie rejestrowaniu, tensometrami lub ekstensometrami, przemieszczeń i wyliczeniu odkształceń materiału skalnego. Badania te mają na celu określenie zależności odkształceń skał od czasu działania stałego naprężenia.

W skałach silnie anizotropowych należy przeprowadzić badanie pełzania, uwzględniając zróżnicowanie przestrzenne właściwości geomechanicznych. Szczególnie istotne jest to w przypadku łupków z dużą zawartością substancji organicznej.

Typowy wykres deformacji skał podatnych na pełzanie w funkcji czasu przy określonych warunkach naprężenia i temperatury przedstawia rysunek 79. Bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia skała ulega odkształceniu sprężystemu (odkształcenie natychmiastowe). Przy niezmiennym obciążeniu, wraz z upływem czasu, sól podlega lepkiej deformacji, czyli pełzaniu. Wyróżnia się trzy etapy pełzania (Proskuriakow i in., 1973 za Hobler, 1977; Ulusay, Hudson, 2007; Tajduś i in., 2012; Ulusay, 2014):

- pełzanie pierwotne lub przejściowe (ang. *primary creep* lub *transient creep*), gdzie tempo deformacji maleje z czasem;
- pełzanie stacjonarne (wtórne, ustalone) (ang. *secondary creep* lub *stationary creep*), kiedy tempo deformacji utrzymuje się na stałym poziomie;
- pełzanie niekontrolowane (ang. *tertiary creep* lub *creep failure*), przy którym tempo deformacji gwałtownie rośnie, prowadząc do spękania.



Rys. 79. Typowa zależność odkształcenia soli w czasie w testach pełzania przy stałym obciążeniu i temperaturze

Badania pełzania mają na celu rozpoznanie zależności odkształceń od czasu przy stałym i niewysokim naprężeniu dyferencjalnym. Wyniki takich badań, w ramach teorii lepkosprężystości mogą zostać przeliczone na funkcje relaksacji naprężeń, opisujące rozpraszanie energii odkształcenia w warstwach skalnych. Dla skał warstwowanych ważne jest również określenie anizotropowych parametrów pełzania.

Badania pełzania można wykonywać w warunkach naprężeń jednoosiowych lub trójosiowych (Hobler, 1977; Ulusay, Hudson, 2007; Ulusay, 2014; Wilczyński, 2018). Do badań pełzania wybrane powinny być próbki, reprezentatywne dla badanych formacji geologicznych, z jednorodnych fragmentów rdzenia wiertniczego. Badania pełzania z uwzględnieniem anizotropii powinny być wykonywane na próbkach pionowych i poziomych o średnicy właściwej dla danego urządzenia trójosiowego (1″, 1,5″), o stosunku wysokości do średnicy 2/1. W tych badaniach szczególnie ważna jest precyzja wycięcia płaskorównoległych próbek cylindrycznych z dokładnością 0,01 mm (maksymalna różnica wysokości próbki).

Obciążanie próbki powinno być wykonane w dwóch etapach:
- etap hydrostatyczny – tylko ciśnienie okólne w kilku krokach ciśnienia (np. 3h – 10 MPa, 3 h – 20 MPa i 3 h – 30 MPa) do wartości średniego naprężenia efektywnego na głębokości badanej próbki;
- etap trójosiowy – dyferencjalne naprężenie o różnych poziomach (np. 6 h – 5 MPa, 6 h – 10 MPa, 6 h – 20 MPa, 6 h – 40 MPa);
- etap końcowy – ostatni krok naprężenia dyferencjalnego powinien stanowić mniej niż 50% wytrzymałości próbki przy danym ciśnieniu okólnym, tak by uniknąć wystąpienia pełzania kruchego.

Jeżeli możliwa jest akwizycja ultradźwiękowa w czasie testów pełzania, to początkiem pełzania kruchego jest moment, gdy prędkości ultradźwięków zaczynają maleć przy wzroście naprężenia dyferencjalnego. Pełzanie trójosiowe należy badać przy wartościach naprężeń dyferencjalnych zbliżonych do spodziewanych wartości *in situ*.

Wstępne założenia dotyczące czasu i wielkości obciążenia powinny być dobrane na podstawie wyników analiz petrofizycznych (zwłaszcza zawartości minerałów ilastych). Badania mogą być prowadzone na wielu poziomach naprężenia, które jednak nie powinny przekraczać 50% naprężenia krytycznego.

3.6.3.2.10. Badania pęcznienia

Pęcznienie jest zjawiskiem powiększenia objętości skały pod wpływem wody. W badaniach pęcznienia określa się trzy parametry pęcznienia (Hobler, 1977; PN-EN 1997-2:2009; Ulusay, Hudson, 2007; Tajduś i in., 2012; Ulusay, 2014):
- wskaźnik ciśnienia;
- wskaźnik odkształcenia;
- odkształcenie pęcznienia.

W przypadku występowania przewarstwień ilastych w masywach skalnych zbudowanych z soli lub w skałach zbiornikowych można wykonywać badania pęcznienia.

Wskaźnik ciśnienia pęcznienia określa się w specjalnym aparacie. Próbkę umieszcza się w taki sposób, że zmiana jej objętości jest niemożliwa. Po dodaniu wody jest mierzone ciśnienie pęcznienia, którego wskaźnik oblicza się:

$$w_{cp} = \frac{F}{A}$$

gdzie:

w_{cp} – wskaźnik ciśnienia pęcznienia [MPa],
F – maksymalna siła osiowa potrzebna do utrzymania stałej wysokości próbki [N],
A – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki [mm^2].

Wskaźnik odkształcenia pęcznienia jest badany na próbce ograniczonej promieniowo i obciążonej osiowo, zanurzonej w wodzie, stosując stałe ciśnienie 0,005 MPa. Wskaźnik oblicza się:

$$w_{op} = \frac{L_k - L_p}{L_p}$$

gdzie:

w_{op} – wskaźnik odkształcenia pęcznienia [–],
L_k – wysokość końcowa próbki [mm],
L_p –wysokość początkowa próbki [mm].

Skały nie ulegające rozmakaniu mogą być badane w warunkach nie ograniczających zmian objętości. Odkształcenia pęcznienia są wtedy mierzone wzdłuż głównych osi w aparacie do badania nieograniczonego pęcznienia próbki skalnej. Osie próbki powinny być prostopadłe do płaszczyzn uwarstwienia skały. Odkształcenia oblicza się dla każdego z pomierzonych kierunków:

$$\varepsilon_x = \frac{L_{kx} - L_{px}}{L_{px}} \cdot 100$$

gdzie:

ε_x – odkształcenie pęcznienia w kierunku osi x [%],
L_{kx} – końcowa odległość między punktami pomiaru w kierunku x [mm],
L_{px} – początkowa odległość między punktami pomiaru w kierunku x [mm].

Parametry pęcznienia skał pełnią rolę wskaźnikową i porównawczą między materiałami i nie powinny być traktowane jako rzeczywiste wartości pęcznienia skały *in situ*.

3.6.4. Zakres badań petrofizycznych i geomechanicznych skał zbiornikowych

Kompleks zbiornikowy powinien cechować się dużym udziałem przestrzeni porów/szczelin dobrze skomunikowanych ze sobą, co w efekcie przekłada się na dobrą przepuszczalność. Sposób powstawania skał zbiornikowych wpływa bezpośrednio na ich parametry petrofizyczne (tab. 60).

Dobre właściwości zbiornikowe kolektorów wykazują zwykle piaskowce, które podczas geologicznej ewolucji nie były pogrążone na duże głębokości, czyli takie których szkielet mineralny nie doznał rozpuszczenia i/lub rekrystalizacji w warunkach wysokich ciśnień i temperatur. Zmiany porowatości w piaskowcach zachodzą na skutek kompakcji

i cementacji przestrzeni porowej. Materiał do tworzenia cementów krzemionkowych najczęściej pochodzi z rozpuszczania labilnych ziaren mineralnych, takich jak skalenie, amfibole i pirokseny. W przypadku piaskowców kwarcowych, redukcja przestrzeni porowej nie przekracza 5% na każdy kolejny kilometr pogrzebania skał. Jednak w przypadku piaskowców litycznych, redukcja ta jest znacznie większa niż 5% (Tucker, 2001).

Zatem w przypadku wstępnego planowania miejsc magazynowania/składowania należy brać pod uwagę historię pogrążenia analizowanych kompleksów. Ponieważ zjawiska związane z redukcją przestrzeni porowej są w znacznej mierze uwarunkowane chemizmem płynów porowych, to intensywności tego procesu nie można jedynie wywodzić z historii pogrążenia i temperatur. Poza krzemionką przestrzeń porowa w kolektorach piaskowcowych może być również zredukowana przez strącanie innych minerałów z solanek. Graniczne wartości porowatości i przepuszczalności, dla których możemy zdefiniować kolektor, zależą od specyfiki funkcjonowania obiektu i właściwości zatłaczanego płynu. Ponieważ jednak, ze względu na zmiany litologii skał w obrębie samego kolektora, parametry te są zmienne w szerokim zakresie, zatem należy uwzględniać tę naturalną zmienność. Należy również uwzględnić, że w obrębie kolektora występują często przewarstwienia skał o niskiej przepuszczalności, lub nawet uznawanych za uszczelniające. Wówczas dla prawidłowej charakterystyki struktury kolektora potrzebne jest określenie ciągłości takich przewarstwień, które ze względu na ograniczoną miąższość nie zawsze są widoczne w obrazie sejsmicznym. Wówczas nieodzowna jest rekonstrukcja środowisk sedymentacji, za pomocą której można oszacować teoretyczną ciągłość oboczną poszczególnych facji. W przypadku występujących ciągłych (w skali podziemnego obiektu) przewarstwień uszczelniających konieczne może być zdefiniowanie wielopoziomowego kolektora, co należy uwzględnić w scenariuszach eksploatacji obiektu (Pieńkowski, 2009).

W obrębie kolektorów należy się liczyć również z możliwością występowania uszczelnień obocznych. W przypadku, gdy uszczelnienie takie wynika z wyklinowania się facji piaszczystych, można je rozpoznać za pomocą wysokorozdzielczej sejsmiki lub opisać metodami sedymentologicznymi. Barierą dla swobodnego przepływu w obrębie kolektorów mogą być również strefy uskokowe, których rdzeń stanowią nieprzepuszczalne skały związane ze strefą dyslokacji. Skały takie zawierają zmieszane minerały ilaste z przemieszczonych uskokiem skał oraz produkty kruszenia skał (kataklazy). Właściwości uszczelniające uskoków są zwykle trudne do określenia metodami geofizycznymi, dlatego trzeba się zdać na prognozy wynikające z profilowania tektonicznego i modelowania opartego na wieloletniej praktyce przemysłu naftowego. Występowanie obocznych uszczelnień pierwszego rzędu w obrębie kolektorów może istotnie ograniczyć pojemność kolektora. Jest również często przyczyną powstawania komórek o odmiennych ciśnieniach porowych (ang. *pressure compartments*). Natomiast wystąpienia mniejszej rangi uskoków lub wstęg deformacyjnych (ang. *deformation bands*) może skutkować horyzontalną anizotropią przepływów w obrębie kolektora, zwłaszcza, gdy struktury takie występują seryjnie i mają uporządkowaną orientację, co jest częstą cechą zespołów struktur tektonicznych. Z drugiej zaś strony, seryjne otwarte spękania tektoniczne mogą przyczynić się do wzrostu efektywnej porowatości i przepuszczalności oraz do jej anizotropii. Są one szczególnie liczne w preferowanych lokalizacjach dla składowisk lub magazynów, jakimi są przeguby antyklin. W przypadkach skrajnych, kolektorem szczelinowym może być gęsto spękana skała o znikomej przepusz-

Tabela 60

Cechy i parametry petrofizyczne skał okruchowych istotne z punktu widzenia podziemnego magazynowania i składowania płynów w strukturach geologicznych (wg Choquette, Pray, 1970)

Cecha/parametr	Skały klastyczne	Skały węglanowe
Porowatość pierwotna	25–40%	40–70%
Porowatość wtórna	połowa porowatości pierwotnej, zwykle 15–30%	brak lub jedynie niewielka część frakcji początkowej; 5–15% w facjach zbiornikowych
Typ porowatości	międzyziarnowa	międzyziarnowa, wewnątrzziarnowa
Rozmiar porów	uzależnione od tekstury: uziarnienie, wysortowanie, obtoczenie	brak zależności między teksturą a porowatością
Kształt porów	„negatyw" kształtu cząstek, silnie związane ze środowiskiem sedymentacyjnym	silnie zróżnicowane, niski związek z warunkami depozycji
Jednolitość rozmiaru, kształtu i rozmieszczenia porów	jednolite parametry dla homogenicznych ciał	zmienne parametry, nawet jeżeli występuje tylko jeden typ skał
Wpływ diagenezy	znikomy, zwykle dotyczy niewielkiej redukcji porowatości pierwotnej przez kompakcje i cementacje	silny wpływ diagenezy. decyduje o porowatości i cementacji
Wpływ szczelinowania	łatwe do określenia wizualnie np. profilując rdzenie lub analizując płytki cienkie	półilościowe szacunki wydają się niemożliwe. oznaczone za pomocą urządzeń do pomiarów porowatości, przepuszczalności oraz ciśnień kapilarnych
Relacja porowatość – przepuszczalność	relatywnie stała	silnie zróżnicowana; generalnie niezależne od tekstury

czalności matrycy skalnej np. lity wapień lub piaskowiec kwarcytyczny.

Do najważniejszych parametrów charakteryzujących kolektor, które z punktu widzenia podziemnego magazynowania i składowania płynów w strukturach geologicznych mają decydujące znaczenie, należą:

– porowatość;
– przepuszczalność;
– gęstość;
– skład mineralny ze szczególnym uwzględnieniem zawartości minerałów reagujących z zatłaczanym płynem i zawartością minerałów ilastych;
– zasolenie i ciśnienie płynów porowych, wskazujące na stopień łączności hydraulicznej kolektora z wyższymi kompleksami;
– właściwości geomechaniczne (wytrzymałościowo-odkształceniowe) charakteryzujące odporność na szczelinowanie hydrauliczne (głównie wytrzymałość na rozciąganie);
– współczynniki tarcia na powierzchniach spękań, kontrolujących zachowanie kolektora w warunkach podwyższonego ciśnienia;
– intensywność i kierunkowość spękania i szczelin, wskazująca na możliwość wystąpienia anizotropii przepływów;
– stan naturalnego naprężenia decydujący o możliwości reaktywacji uskoków na skutek podwyższenia ciśnienia porowego podczas eksploatacji obiektu.

3.6.5. Zakres badań petrofizycznych i geomechanicznych skał uszczelniających

Formacje skalne słaboprzepuszczalne wykształcone jako skały izolujące w przypadku podziemnego magazynowania i składowania mogą pełnić dwie funkcje:

– jako warstwa zbiornikowa w odniesieniu do budowy w niej obiektu podziemnego;
– jako warstwa/y uszczelniająca/e dla warstw zbiornikowych obiektu podziemnego.

Do formacji skalnych wykorzystywanych do ww. celów zaliczono: skały krystaliczne, skały ilaste i sole (patrz: cz. I, rozdz. 2.3). Formacje skalne słaboprzepuszczalne mają wiele cech korzystnych dla pełnienia funkcji uszczelnień formacji zbiornikowych (Norris, 2019):

– dzięki niskiej przepuszczalności w formacjach skalnych słaboprzepuszczalnych praktycznie nie ma ruchu płynów, a więc transport zanieczyszczeń jest ograniczony;
– przy ograniczonym ruchu cieczy, transport w formacjach skalnych słaboprzepuszczalnych ma charakter dyfuzyjny, co oznacza, że zanieczyszczenia migrują przede wszystkim pod wpływem gradientu ich stężeń;
– niektóre formacje skalne słaboprzepuszczalne mają dużą zdolność sorpcji wielu zanieczyszczeń, które ulegają wówczas permanentnemu uwięzieniu w obrębie uszczelnienia;
– niektóre formacje skalne słaboprzepuszczalne wykazują wysoką zdolność do samouszczelnienia na skutek np. pęcznienia minerałów ilastych;
– na skutek braku przepływu wód porowych formacje skalne słaboprzepuszczalne nie ulegają przemianom chemicznym w takim stopniu jak inne bardziej przepuszczalne skały;
– ze względu na niską energię środowisk depozycyjnych formacji skalnych słaboprzepuszczalnych wykazują one często dużą jednorodność w pionie i ciągłość oboczną, czyli zachowują stałe właściwości uszczelniające, które można scharakteryzować badaniami w pojedynczych otworach wiertniczych.

Biorąc pod uwagę szereg komplikacji przy definiowaniu zasięgu kolektora, można go określić zasięgiem kompleksu skał uszczelniających.

O tym, czy dany kompleks można uznać za uszczelnienie (ang. *caprock*) decyduje jego przepuszczalność, miąższość, ciągłość i kruchość. Za efektywne skały uszczelniające uważa się ewaporaty takie jak sól kamienna (NaCl) oraz anhydryt ($CaSO_4$), które mają znikomą przepuszczalność i nie wykazują kruchości na dużych głębokościach. Powszechnie występującymi uszczelnieniami są łupki, które jak się szacuje stanowią ok. 70% objętości wszystkich kompleksów osadowych. Skałami mogącymi pełnić funkcję uszczelnienia mogą być również margle, gezy oraz skały krystaliczne, ale ich znaczna kruchość podwyższa ryzyko tektonicznego rozszczelnienia. Właściwości uszczelnienia muszą być zatem zdefiniowane indywidualnie dla danego obiektu, gdyż np. kryteria będą różne dla magazynów i składowisk. W przypadku soli kamiennej przyjmuje się, że jej szczelność jest doskonała i pozostaje jedynie określenie obocznej ciągłości pokładu soli. Ze względu na mobilność soli na dużych głębokościach, za co odpowiada mechanizm pełzania w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia (p/T), może dochodzić do lokalnego jej wyklinowania. Zjawiska te są zwykle dobrze widoczne w obrazie sejsmicznym. Z kolei uszczelnienie łupkami jest tym skuteczniejsze, im większy jest w nich udział minerałów ilastych, których obecność powoduje nie tylko spadek przepuszczalności, lecz także wzrost podatności na pełzanie (Sone, Zoback, 2013), co obniża skłonność do pękania. Ze względu na spokojne środowiska sedymentacji, łupki wykazują zwykle dużą ciągłość oboczną oraz małe zmiany miąższości i litologii na przestrzeni wielu kilometrów. Dlatego ich staranna charakterystyka sedymentologiczna i petrofizyczna w otworze wiertniczym może być niekiedy ekstrapolowana na obszar całego obiektu. Laminacja litologiczna łupków oraz spowodowane kompakcją płaskie ułożenie pakietów minerałów ilastych sprawia, że łupki wykazują silną anizotropię przepuszczalności, z niższą przepuszczalnością w kierunku poprzecznym do laminacji (Burton, Wood, 2013).

Ciągłość uszczelnień łupkowych może zostać przerwana strukturami tektonicznymi. Duże uskoki, rozrywające kilkudziesięciometrowej miąższości uszczelnienia, zwykle są widoczne na profilach sejsmicznych. Bez względu na teoretyczny stopień uszczelnienia stref rozrywających uszczelnienie, ich obecność wyklucza zlokalizowanie obiektu. W przypadku uskoków o zrzutach mniejszych, należy uwzględnić ich właściwości uszczelniające. Uważa się, że stopień uszczelnienia uskoków jest tym większy, im większy jest udział

litologii uszczelniających w kompleksach przemieszczonych uskokiem (Zheng i in., 2000). Dlatego uskoki tnące uszczelnienia łupkowe o dużej miąższości powinny mieć właściwości uszczelniające, chociaż zależą one również od współczesnej aktywności tektonicznej takich struktur (Zoback, 2007). W przypadku dużej podatności kompleksów uszczelniających (soli, łupków ilastych) uskoki często wygasają w ich obrębie lub przekształcają się w ugięcia fleksuralne, które nie przerywają ciągłości uszczelnienia, ale mogą prowadzić do zagęszczenia spękań.

Osobnym problemem jest występowanie w obrębie uszczelnienia siatki otwartych spękań. O ile w solach spękania takie zwykle nie występują, o tyle w łupkach często obserwuje się cały system seryjnych spękań zwanych ciosem (Dadlez, Jaroszewski, 1994). Ponieważ łupki są najczęściej występującą skałą macierzystą dla węglowodorów, ich ekspulsja jest w stanie wygenerować gęstą sieć drobnych spękań i uskoków (Jarosiński i in., 2023). Struktury te w zależności od ich późniejszej mineralizacji stanowią mechaniczną nieciągłość lub osłabienie skały. Spękania takie zwykle nie mają dużej pionowej ciągłości, ale dzięki znacznej gęstości zespołów, w pewnych warunkach mogą stanowić efektywne drogi migracji płynów w poprzek uszczelnienia. Występowanie takich spękań można stwierdzić na podstawie danych otworowych, a ich charakterystyka w jednym miejscu powinna być reprezentatywna dla większego obszaru. Przepuszczalność takich szczelin można badać laboratoryjnie na próbach skalnych z rdzenia wiertniczego, w warunkach obciążenia *in situ* z uwzględnieniem wielkości naprężeń tektonicznych. Przy definiowaniu uszczelnienia obiektu łupkami, w których zagrożenie wyciekiem może być trudne do zweryfikowania, ważną rolę odgrywa uszczelnienie zapasowe (ang. *backup caprock/seal*), znajdujące się powyżej głównego. Zazwyczaj eliminuje ono zagrożenie dla środowiska, gdyż wyciekający płyn o ograniczonej objętości jest rozpuszczany lub rozcieńczany w solance wyższego kompleksu przepuszczalnego i nie powoduje podwyższenia ciśnienia w zapasowym uszczelnieniu. Efektywną przepuszczalność uszczelnienia można badać ciśnieniowymi testami otworowymi (ang. *hydraulic fracturing* i/lub *leak off tests*). W ramach eksperymentów laboratoryjnych można określić ciśnienie przebicia się płynu przez skały uszczelnienia (ang. *capillary entry pressure*). Testy takie prowadzone w warunkach złożowych określają maksymalne dopuszczalne ciśnienie w kolektorze wzbudzone zatłaczaniem danego płynu (np. dwutlenku węgla, metanu, wodoru czy mieszaniny tych gazów), powyżej którego uszczelnienie nie stanowi już efektywnej bariery.

Spośród parametrów istotnych dla charakteryzowania skał uszczelnienia można wymienić:

- przepuszczalność;
- skład mineralny ze szczególnym uwzględnieniem zawartości minerałów ilastych decydujących o innych parametrach uszczelnienia;
- reaktywność minerałów z substancją/odpadem charakteryzująca zagrożenie chemicznej degradacji uszczelnienia;
- cechy petrograficzne, np. określenie krystaliczności soli, stref kontaktowych soli z materiałem ilastym, sposób i tempo powstawania szczelin z wysychania oraz ewentualnej propagacji mikrospękań;
- skład chemiczny (w szczególności dla soli, patrz: cz. II, rozdz. 3.7);
- zasolenie i ciśnienie płynów porowych wskazujące na szczelność ośrodka;
- ciśnienie kapilarne wstąpienia powodujące wnikanie (ang. *capillary entry pressure*) płynu w uszczelnienie;
- ciśnienie dezintegracji (ang. *fracturing overpressure*), które jest uwarunkowane wielkością współczesnych naprężeń tektonicznych oraz występowaniem uskoków rozrywających warstwę;
- właściwości geomechaniczne (wytrzymałościowo-odkształceniowe) charakteryzujące odporność na szczelinowanie hydrauliczne (głównie wytrzymałość na rozciąganie);
- intensywność spękania poszczególnych warstw uszczelnienia, wskazujące na możliwość połączenia hydraulicznego spękań;
- stan naturalnego naprężenia decydujący o podatności na szczelinowanie hydrauliczne i reaktywację uskoków w obrębie uszczelnienia;
- stan masywu skalnego.

3.7. BADANIA GEOCHEMICZNE

Do grupy badań geochemicznych zaliczono wszelkie badania związane z chemizmem zarówno ośrodka gruntowego/skalnego, jak i ewentualnych oddziaływań pomiędzy ośrodkiem gruntowym/skalnymm a zatłaczanym medium. W większości są to badania składu chemicznego gruntów, skał lub wody wykonywane w laboratorium, ale w grupie tej znajdują się też badania powierzchniowe *in situ* skojarzone z monitoringiem środowiska przed i w trakcie realizacji obiektu podziemnego, takie jak: pomiary hydrogeologiczne w otworach, badania powietrza glebowego, badania przewodność itp.

Właściwości chemiczne ośrodka skalnego lub wód złożowych mogą znacząco wpływać na zachowanie górotworu pod wpływem czynników zewnętrznych. Mają wpływ m.in. na chłonność odwiertów, możliwe zjawiska kolmatacji ośrodka porowatego, ługowalność utworów solnych itp.

Badania właściwości chemicznych są wykonywane zawsze w przypadku lokalizowania obiektu podziemnego w obrębie utworów solnych, gdyż od ich składu chemicznego zależy skład solanki podczas ługowania oraz ewentualne deformacje komór w okresie eksploatacji. Badaniom tym poddaje się każdy różniący się litologicznie rodzaj soli. Oznaczyć należy procentową zawartość:

- podstawowych składników rozpuszczonych w wodzie (Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, SO_4^{2-}, Na^+);
- podstawowych składników nierozpuszczonych w wodzie (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}) oraz części ilaste;
- metali ciężkich (Cd, Pb, As, Hg, Cu, Zn, Ni, Cr, Mn, Sr);
- bromu.

Składniki rozpuszczone w wodzie pozwalają wyliczyć zawartość poszczególnych soli, w tym w szczególności NaCl oraz soli potasowo-magnezowych, których zawartość wpływa na właściwości ługownicze i finalny kształt komory. Składniki nierozpuszczone wskazują na ewentualną ilość materiału spadającego na dno komory po wyługowaniu. W zależności od potrzeb bada się również **gazonośność** soli na podstawie zawartości gazów w wodzie rozpuszczonej.

Utwory solne bada się również pod kątem **właściwości ługowniczych**. Ługowalność oblicza się z wzoru na podstawie uzyskanych w laboratorium pomiarów szybkości rozpuszczania płaskiej powierzchni solnej o określonych rozmiarach przy kontakcie z wodą wodociągową o temperaturze 20°C. Dla każdej próbki oznacza się ługowalność stropową oraz boczną. Do obliczenia ługowalności niezbędne jest także oznaczenie ciężaru objętościowego badanych próbek soli.

Istotnym problemem w przypadku magazynowania substancji i składowania odpadów w górotworze są **reakcje chemiczne** zachodzące pomiędzy zatłaczanym medium a wodą złożową i skałą zbiornikową (Lewkiewicz-Małysa, Winid, 2011). Reakcje te mogą powodować np. wytrącanie się substancji mineralnych do zatłaczanego medium lub wręcz odwrotne zjawisko rozpuszczania poszczególnych substancji ze środowiska skalnego, w które medium jest zatłaczane. Skład zatłaczanego medium może z kolei wpływać na powstawanie nowych substancji, tworząc niekorzystne zawiesiny lub roztwory koloidalne również powodując kolmatacje. Zjawiska te są trudne do przewidzenia i do ujęcia w modelu, jednak znając dokładnie skład chemiczny, zarówno zatłaczanego medium, jak również otaczających skał i wód złożowych, można znacząco te ryzyko zmniejszać, stosując odpowiednie zabiegi technologiczne służące oczyszczeniu medium ze składników mogących wywoływać tego typu zjawiska. Podobnie trudne jest modelowanie zjawisk przepływu gazu w obrębie pokładów węgla (Kidybiński, Siemek, 2006).

Monitoring geochemiczny, dla którego ogólne założenia należy podać już w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, służy ocenie środowiska geologicznego pod kątem ewentualnych wycieków z obiektu lub instalacji towarzyszących (patrz: cz. I, rozdz. 8.3). Wykorzystuje się standardowe metody pomiarowe w piezometrach lub w specjalnie wykonanych do tego celu płytkich otworach wiertniczych. Do badań tych należy zaliczyć:

- analizę chemizmu wód powierzchniowych i podziemnych metodami wskaźnikow:ymi;
- analizy fizykochemiczne próbek wód powierzchniowych i gruntowych (badania wskaźników takich jak: siarczany, przewodnictwo właściwe, sucha pozostałość, twardość ogólna);
- pomiary zawartości węglowodorów w solance;
- badania oznaczenia składu powietrza gruntowego;
- pomiary metanu i gazów toksycznych w powietrzu glebowym (w przypadku badań na obszarach kopalń węgla kamiennego);
- analizy chromatograficzne próbek wody;
- pomiar pH gleby.

3.8. POMIARY GEODEZYJNE POWIERZCHNIOWE

Pomiary geodezyjne powierzchniowe służą dwóm celom: dokładnej lokalizacji wszystkich prac polowych oraz prowadzeniu monitoringu powierzchniowego ewentualnych deformacji terenu.

Lokalizacja geodezyjna prac polowych jest bardzo ważnym aspektem dokumentowania geologiczno-inżynierskiego. Jest wiele udokumentowanych przykładów braku możliwości wykorzystania cennych archiwalnych otworów wiertniczych z uwagi na ich wątpliwą lokalizację. Takie otwory, czy profile sejsmiczne, których lokalizacja jest mało dokładna lub niepewna, nie powinny być wykorzystywane w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim. Dzięki coraz bardziej zaawansowanym technikom geodezyjnym pomiary geodezyjne służące lokalizowaniu badań przebiegają obecnie bardzo szybko i mają dużą dokładność, nawet rzędu kilku centymetrów. Otwory archiwalne, jeśli to możliwe, powinny zostać poddane geodezyjnej weryfikacji lokalizacji. W komplecie z danymi x i y powinny być dostarczane także pomiary rzędnych wysokościowych wszystkich punktów badawczych i ciągów geofizycznych w punktach charakterystycznych. Służy to odpowiedniemu dopasowaniu danych. Metodyka pomiarów geodezyjnych nie jest przedmiotem poradnika, można ją znaleźć w wielu przekrojowych pracach dotyczących dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (np. Majer i in., 2018; Ostrowski i in., 2022) lub wytycznych branżowych (np. Wytyczne..., 2019; Majer, Sokołowska, 2021) oraz rozporządzeniach wykonawczych (Rozporządzenie Ministra Rozwoju..., 2020)

Geodezyjny monitoring powierzchniowy polega na kontroli warunków panujących w górotworze przez pomiar przemieszczeń pionowych na powierzchni w stałym interwale czasowym, zależnym od sytuacji geologicznej (struktury) i rodzaju obiektu (nie rzadziej niż co 5 lat). W przypadku istniejących zakładów górniczych jest on z reguły założony od samego początku eksploatacji. Jest to najczęściej sieć reperów powierzchniowych i/lub wgłębnych o gęstości siatki zależnej od spodziewanego zasięgu i wielkości odkształceń. W przypadku nowych obiektów podziemnych, sieć monitoringu powierzchniowego planuje się już na etapie pozyskiwania koncesji. Zakłada się go przed rozpoczęciem eksploatacji obiektu w celu ustalenia tzw. stanu zerowego. Zalecenia dla monitoringu powierzchniowego przedstawia się także w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (jest to wymóg rozporządzenia).

3.9. BADANIA WYROBISK GÓRNICZYCH

Wykorzystanie wyrobisk górniczych na obiekty podziemne wymaga przeprowadzenia specjalistycznych badań, które prowadzi się w:

- komorach solnych specjalnie ługowanych na potrzeby magazynowania i składowania;
- komorach solnych adaptowanych po wyeksploatowaniu soli (tzw. komory poeksploatacyjne) na potrzeby magazynowania i składowania;

– komorach skalnych specjalnie wykonanych na potrzeby magazynowania i składowania;
– wyeksploatowanych wyrobiskach górniczych czynnych lub nieczynnych kopalń podziemnych.

W zależności od rodzaju obiektu podziemnego, w wyrobiskach górniczych wykonuje się prace i badania obejmujące m.in. (Marcak, Pilecki, 1998; Kidybiński, 2004; Kidybiński, Siemek, 2006; Dobak i in., 2009; Poborska-Młynarska, 2022):
– szczegółowe kartowanie geologiczno-inżynierskie ścian wyrobisk kopalń podziemnych i komór skalnych, w tym bezpośrednie obserwacje zachowania się ociosów, filarów, stropów; analizy kierunków i zagęszczenia szczelin w górotworze oraz inwentaryzacja zagrożeń wodnych/gazowych;
– pobór próbek (monolitów i rdzeni) ze ścian wyrobisk do badań fizycznych (w tym rozmakalności) i geomechanicznych (wytrzymałościowych i odkształceniowych) dla wydzielonych typów litologicznych skał z uwzględnieniem aktualnego ruchu kopalni, przy czym długość rdzenia powinna być równa szerokości wyrobiska;
– pomiary kształtu, głębokości i objętości;
– badanie wytrzymałości *in situ* z zastosowaniem specjalistycznych urządzeń, np. hydraulicznego penetrometru otworowego – do tego celu wykonuje się krótkie (do 10 m) otwory wiertnicze wykonane z wnętrza badanego wyrobiska;
– badanie odkształcalności górotworu w układzie płaskim lub cylindrycznym (z wykorzystaniem obciążenia ścian dźwigarami hydraulicznymi);
– pomiary temperatury w wyrobisku;
– badanie drożności gazowej szczelin w specjalnie wykonanych do tego celu otworach;
– badania georadarowe do lokalizowania szczelin w górotworze;
– badania szczelności: wyrobisk górniczych za pomocą metod geofizycznych, geochemicznych, hydrodynamicznych i wiertniczych; komór solnych za pomocą solanki;
– pomiary konwergencji;
– badanie stanu technicznego wyrobisk, komór oraz otworów eksploatacyjnych.

Pomiary konwergencji mają kluczowe znaczenie m.in. do weryfikacji przeprowadzonej wstępnie oceny zachowania i stateczności wyrobisk górniczych opracowanej na podstawie modelowania numerycznego (patrz:cz. II, rozdz. 5). Konwergencja[53] to proces polegający na powolnym i stopniowym samozaciskaniu się wyrobisk górniczych powodujący zmianę ich wymiarów, stanowi także miarę procesu zaciskania (Kortas, 2001, 2004; Kunstman i in., 2002; Szpunar, Budak, 2002, 2005; Maj, 2009; Marczak, 2010). Charakter konwergencji zależy przede wszystkim od wielkości naprężeń w otoczeniu wyrobiska oraz właściwości skał, w których są wykonane. Obserwując zmiany konwergencji w czasie, można określić proces deformacji w otoczeniu wyrobisk i przewidywać jak będzie zachodzić w przyszłości (Jankowska, Kwaśniak, 2015). Na zmienność konwergencji w czasie wpływa wiele czynników geologiczno-górniczych i eksploatacyjnych, w tym m.in. głębokość położenia wyrobiska, wielkość przekroju poprzecznego wyrobiska oraz oddziaływania sąsiedniej eksploatacji (Ślizowski J. i in., 2007; Ślizowski K. i in., 2009; Kunstman i in., 2009; Bieniasz i in., 2011; Galiniak, 2020). Ponieważ wraz z głębokością rośnie ciśnienie litostatyczne i temperatura skał, głębiej posadowione wyrobiska ulegają szybszemu zaciskaniu (konwergencji), a otaczający górotwór ulega deformacjom i przemieszczeniom (Ślizowski i in., 2007; Kunstman i in., 2009). W wyniku konwergencji pojemność początkowa wyrobisk górniczych przeznaczonych do magazynowania lub składowania maleje w czasie (Ślizowski i in., 2007; Kunstman i in., 2009). W przypadku podziemnych magazynów substancji na zminimalizowanie konwergencji wyrobisk górniczych największy wpływa ma wartość ciśnienia roboczego i charakter jego zmian, a zwłaszcza różnica pomiędzy ciśnieniem magazynowanej substancji w wyrobisku (w szczególności istotna jest wartość minimalna) i ciśnieniem wytworzonym poprzez ich sprężanie (w przypadku gazu) a naprężeniami pierwotnymi górotworu (Ślizowski i in., 2007; Kunstman i in., 2009; Galiniak, 2020). W przypadku obiektów podziemnych w wyrobiskach kopalń podziemnych w górotworze solnym (doświadczenia kłodawskie) szybkość zaciskania calizn konturu solnego ulega wyhamowaniu z czasem i po dłuższym okresie stabilizuje się na poziomie znacznie niższym od początkowego (Bieniasz i in., 2003, 2011).

Konwergencja może być zjawiskiem korzystnym, gdyż prowadzi do samoistnego zaciskania się nieciągłości w górotworze. Natomiast może ona powodować zmniejszenie pojemności magazynu/składowiska lub deformacje powierzchni terenu (Kunstman i in., 2009).

Na potrzeby rozpoznania zjawiska zaciskania wyrobisk górniczych niezwykle istotny jest długi czas regularnych obserwacji konwergencji (Bieniasz i in., 2011; Jankowska, Kwaśniak, 2015). Pomiary konwergencji są wykonywane najczęściej metodami geodezyjnymi lub niegeodezyjnymi (Maj, 2009). Pomiary geodezyjne są stosowane w szczególności w górnictwie podziemnym. Jest to głównie obserwacja przemieszczeń pomiędzy punktami pomiarowymi z zastosowaniem stacji pomiarowych, dalmierzy, konwergometrów, ekstensometrów lub stosowanie metod pośrednich np. skaningu laserowego (Bieniasz i in., 2003; Maj, 2009; Marczak, 2010; Maj, 2011; Jankowska, Kwaśniak, 2015; Gogolewska, Markowiak, 2017). Metody niegeodezyjne stosuje się głównie w przypadku pomiarów objętościowej konwergencji kawern. Do tego celu stosuje się pomiary objętości solanki, pomiary zmian ciśnienia w kawernie lub pomiary kształtu komór z zastosowaniem echosondy ultradźwiękowej, kawernomierza wielkośrednicowego, czy inklinometru otworowego (Maj, 2009; Nguyen i in., 2019).

Stan techniczny wyrobisk górniczych w kopalniach podziemnych oraz w specjalnie wykonanych komorach skalnych można oceniać z zastosowaniem metody punktowej (Kidybiński, Siemek, 2006). W metodzie tej wykorzystuje się wskaźnik oceny technicznej wyrobiska (WOTW). Punkty

[53] Ważniejsze definicje podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

przyznawane są na podstawie czterech cech górotworu (Kidybiński, Siemek, 2006):

– wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie skał (Rc);
– wskaźnika RQD;
– wskaźnika rozmakalności (*r*);
– wskaźnika drożności szczelin w górotworze (*Ks*).

Dodatkowo stosuje się współczynniki korygujące w zależności od dodatkowych czynników, w szczególności: historii eksploatacji, wieku wyrobiska, wskaźnika korozji oraz wszelkiego rodzaju deformacji wyrobiska, w tym uszkodzeń opinki stropów/ociosów lub też obudowy.

Na podstawie uzyskanej wartości wskaźnika oceny technicznej wyrobiska (WOTW) określa się przydatność zbiornikową na podstawie trzech klas (I–III), przy czym klasa I oznacza przydatność do magazynowania, natomiast klasa III jej brak.

Metoda oceny przydatności może być również stosowana w formie uproszczonej z zastosowaniem jakościowych charakterystyk górotworu, uwzględniających szacunkowe wartości parametrów wytrzymałościowych oraz ciągłość i jakość górotworu.

4. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNE I AKUSTYCZNE

Dokumentacja geologiczno-inżynierska na potrzeby podziemnego magazynowania i podziemnego składowania powinna zawierać opis i ocenę właściwości fizyczno-mechanicznych wydzielonych zespołów gruntów i skał, w tym wyniki badań właściwości skał kolektorskich i ich osłony w zakresie parametrów fizyczno-mechanicznych i akustycznych.

Z uwagi na dowolność w ustalaniu właściwości fizyczno-mechanicznych i akustycznych, które wyznacza się na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, w tabeli 61 podano przykładowy katalog parametrów i metod badań próbek skał. Podany zestaw parametrów jest przykładowy i powinien być modyfikowany w zależności od rodzaju obiektu podziemnego, potrzeb modelowania numerycznego oraz wymagań projektowych.

Opis właściwości fizyczno-mechanicznych i akustycznych skał jest wymagany rozporządzeniem ws. dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016).

Istotnym źródłem archiwalnych informacji o właściwościach skał, które mogą uzupełnić zbiory danych z badań laboratoryjnych, są katalogi właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał w ujęciu regionalnym (Pinińska, 1994–1997, 1999, 2000a, 2003, 2004b; Pinińska, Dziedzic, 2006, 2007; Domonik, 2012a, b). Dane zawarte w publikacjach mogą być również przydatne do modelowania numerycznego (patrz: cz. II, rozdz. 5).

Katalog właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów został przedstawiony w wielu publikacjach branżowych o charakterze wytycznych lub poradników (np. Majer i in., 2018; Tarnawski, 2020) i na ich podstawie zaleca się wyznaczać parametry gruntów potrzebne do posadowienia części naziemnej obiektu podziemnego.

Nowe zalecenia metodyczne w zakresie badań skał w warunkach laboratoryjnych oraz polowych podano w projekcie normy prEN 1997-2:2022 (E).

Tabela 61

Przykładowy katalog parametrów, które zaleca się wyznaczyć na potrzeby opisu właściwości fizyczno-mechanicznych skał oraz modelowania numerycznego

Parametr	Symbol	Jednostka	Rodzaj badania		Metoda badań
1	**2**	**3**	**4**		**6**
Badania petrofizyczne					
Opis petrograficzny	–	–	badania chemiczne	badania petrograficzne	PN-EN 932-3 (aktualna) PN-EN 12407 (aktualna)
Skład mineralny	–	–		badania mineralogiczne	ASTM D2799 ASTM E562 PN-EN ISO 14689 (aktualna)
Zawartość węglanów	–	–		badania zawartości węglanów	PN-EN ISO 10693 (aktualna) (metoda Scheiblera), procedury własne, badania mikroskopowe
Uziarnienie skały	–	%	badania fizyczne	badania uziarnienia	ASTM C110 PN-EN ISO 17892-4 (aktualna) PN-B-04481:1988 (wycofana bez zastąpienia)
Wilgotność skały	w	%		badania wilgotności	instrukcje ISRM PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1097-5 (aktualna)
Gęstość właściwa szkieletu skalnego (gęstość)	ρ_r, ρ	Mg/m^3 (kg/m^3)		badania gęstości	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1936 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D5550 ASTM C110 ASTM D8097 PN-B-04100 (wycofana, zastąpiona przez PN-EN 1936) ISO 15901-1 (aktualna) ASTM D4404
Gęstość objętościowa skały	ρ_b, ρ_s	Mg/m^3 (kg/m^3)			

Tabela 61 cd.

1	2	3	4		6
Porowatość całkowita	P_c, p, n	%	badania fizyczne	badania porowatości	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1936 (aktualna) ISO 15901-1 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D4404 PN-B-04100 (wycofana, zastąpiona przez PN-EN 1936)
Porowatość otwarta	P_o, p_o, n_o	%			
Nasiąkliwość wagowa	A_b, n_w	%		badania nasiąkliwości	PN-EN 13755 (aktualna) PN-B-04101 (wycofana, zastąpiona przez PN-EN 13755)
Nasiąkliwość objętościowa	n_o	%			
Nasiąkliwość kapilarna	Y	g/m^2			PN-EN 1925 (aktualna)
Rozmakalność	trzyliterowy symbol (od A do H)	–		badania rozmakalności	metoda Skutty (Skutta, 1962 za Kidybiński, 2004)
Wskaźnik rozmakalności	*r*	-,%			test trzydobowy (Kidybiński 1979, 1982, 1985 za Kidybiński, 2004) PN-G-04352 (wycofana bez zastąpienia)
Ubytek masy próbki pomiędzy masą przed zamrożeniem i po ostatnim cyklu odmrożenia	S	%		badania mrozoodporności	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1367-1 (aktualna) PN-EN 12371 (aktualna) PN-B-04102 (wycofana, zastąpiona przez PN-EN 12371)
Współczynnik odporności na zamarzanie	w_m	–, %			
Przewodność cieplna	λ, k	W/K m		badania termiczne	ASTM D5334
Rozszerzalność cieplna	α	1/K			instrukcja producenta, procedury własne
Pojemność cieplna	C	J/K			instrukcja producenta, procedury własne
Dyfuzyjność cieplna	α	m^2/s			ASTM D4612
Wskaźnik rozmywalności	I_D R_w	%		badania rozmywalności	Thiel (1989)
Współczynnik przepuszczalności (przepuszczalność)	k_p, K	D, mD (m^2)		badania przepuszczalności	pomiary w stanie ustalonym pomiary w stanie nieustalonym – metoda Pulse Decay (pomiar na rdzennikach) metoda spadku ciśnienia (pomiar na okruchach skalnych) na podstawie wyników z porozymetru rtęciowego MICP test desorpcji pomiary spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego NMR
Współczynnik wodoprzepuszczalności (filtracji)	k_f	m/s			
Współczynnik wodochłonności	w_{ch}	%			
Wodochłonność jednostkowa	q	dm^3/min/ 0,01MPa/m			
Wietrzenie	–	–		badania wietrzenia	PN-EN ISO 14689 (aktualna)
Rozpuszczalność	α	$nm^3/m^3 \times Pa$		badania rozpuszczalności	instrukcja producenta, procedury własne
Oporność elektryczna	ρ	Ωm		badania elektrooporowe	instrukcja producenta, procedury własne
Badania geomechaniczne					
Pionowe naprężenie *in situ*	σ_{v0}	MPa	określenie parametrów stanu naprężeń		instrukcje ISRM
Poziome naprężenie *in situ*	σ_{h0}	MPa			
Naprężenie ścinające	τ	MPa			
Naprężenie normalne	σ_n	MPa			
Naprężenie rozciągające	σ_T	MPa			

Tabela 61 cd.

1	2	3	4		6
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	σ_c, R_c	MPa	badania wytrzymałościowe	badania jednoosiowego ściskania	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1926 (aktualna) PN-G-04303 (aktualna) PN-G-04307 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D7012 PN-B-04110 (wycofana, zastąpiona przez PN-EN 1926)
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku prostopadłym do uwarstwienia	$\sigma_{c\perp}$, $R_{c\perp}$	MPa			
Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku równoległym do uwarstwienia	$\sigma_{c\parallel}$, $R_{c\parallel}$	MPa			
Skorygowana wytrzymałość na obciążenie punktowe	$I_{s(50)}$	MPa		badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskani próbek nieforemnych (test punktowego obciążenia)	PN-EN 1997-2 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D5731
Wskaźnik anizotropii wytrzymałości	A	–		badania jednoosiowego ściskania	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 1926 (aktualna) PN-G-04303 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D7012
				badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskani próbek nieforemnych (test punktowego obciążenia)	PN-EN 1997-2 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D5731
Wytrzymałość na trójosiowe ściskanie	σ_{tc}, R_{tc}	MPa		badania wytrzymałościowe w warunkach trójosiowego ściskania	PN-EN 1997-2 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D7012
Kąt tarcia wewnętrznego	ϕ	°			
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego	ϕ'	°			
Rezydualny efektywny kąt tarcia wewnętrznego	ϕ'_R	°			
Spójność	c	kPa			
Spójność efektywna	c'	kPa			
Rezydualna spójność efektywna	c'_R	kPa			
Wytrzymałość na ścinanie	σ_t, R_t	MPa		badania wytrzymałości na ścinanie	PN-G-04304 (aktualna) instrukcje ISRM konieczne uwzględnienie warstwowania i nieciągłości
Maksymalna wytrzymałość na ścinanie	σ_{tmax}, R_{tmax}	MPa			
Rezydualna wytrzymałość na ścinanie	σ_{tR}, R_{tR}	MPa			
Wytrzymałość na rozciąganie	σ_l, σ_r, R_r	MPa		badania wytrzymałości na rozciąganie i zginanie	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 12372 (aktualna) PN-EN 13161 (aktualna) PN-G 04302 (aktualna) PN-G 04305 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D2936 ASTM D3967
Wytrzymałość na zginanie	σ_g, R_g	MPa			

Tabela 61 cd.

1	2	3	4		6
Moduł Younga (statyczny, dynamiczny)	E, E_{st}, E_d	MPa, GPa	badania odkształceniowe	badania dynamiczne	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 14580 (aktualna, niezalecana) PN-EN 14146 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D7012
				sondowanie DMT EDMT	ASTM D8359
				sondowanie FDT (RDT) EFDT	PN-EN ISO 22476-5 (aktualna)
				obciążenie płytą sztywną (*rigid plate loading*) E_{rm}	ASTM D4394
				obciążenie płytą elastyczną (*flexible plate loading method*) E_{rm}	ASTM D4395
				badanie odkształcalności górotworu w układzie radialnym (*radial jacking test*) E_{rm}	instrukcje ISRM ASTM D4506
				badanie z zastosowaniem wielkoskalowej poduszki ciśnieniowej (*large flat jack tests*) E_{rm}	instrukcje ISRM ASTM D4729
Współczynnik Poissona (statyczny, dynamiczny)	ν, ν_{st}, ν_d	–		badania dynamiczne	PN-EN 1997-2 (aktualna) PN-EN 14146 (aktualna) instrukcje ISRM ASTM D7012
Moduł ścinania (statyczny, dynamiczny)	G, G_{st}, G_d	MPa, GPa			
Moduł Helmholtza (statyczny, dynamiczny)	K, K_{st}, K_d	MPa, GPa			
Ściśliwość	β	1/Pa		badania ściśliwości	instrukcje ISRM
Pełzanie	μ	MPa s		badania reologiczne	instrukcje ISRM
Wskaźnik ciśnienia pęcznienia	w_{cp}	MPa		badania pęcznienia	PN-EN 1997-2 (aktualna) instrukcje ISRM Hobler (1977)
Wskaźnik odkształcenia pęcznienia	w_{op}	–			
Odkształcenie pęcznienia	ε_x	%			

Tabela 61 cd.

1	2	3	4		6
Prędkość fali podłużnej w kierunku prostopadłym do uwarstwienia	$Vp_{\perp}$	m/s	badania akustyczne	badania dynamiczne	instrukcja producenta procedury własne PN-EN 14579 (aktualna)
Prędkość fali podłużnej w kierunku równoległym do uwarstwienia	$Vp_{\parallel}$	m/s			
Prędkość fali poprzecznej w kierunku prostopadłym do uwarstwienia	$Vs_{\perp}$	m/s			
Prędkość fali poprzecznej w kierunku równoległym do uwarstwienia	$Vs_{\parallel}$	m/s			
Prędkość fali powierzchniowej w kierunku prostopadłym do uwarstwienia	$Vr_{\perp}$	m/s			
Prędkość fali powierzchniowej w kierunku równoległym do uwarstwienia	$Vr_{\parallel}$	m/s			

5. MODELOWANIE NUMERYCZNE

Ze względu na złożoność procesów i niejednorodność struktur geologicznych, modelowanie numeryczne jest często jedyną metodą przewidywania warunków działania i efektów oddziaływania na środowisko projektowanych składowisk i magazynów. Modelowanie numeryczne wymaga przyjęcia pewnego **modelu**, który będzie stanowić uproszczoną reprezentację układu złożonego z obiektu i jego otoczenia w postaci algorytmów oddających fizyczną charakterystykę zachodzących procesów. Tworzenie modelu opiera się więc na systemie założeń, pojęć i zależności między poszczególnymi jego cechami i ma na celu, w sposób przybliżony, przedstawić określony aspekt rzeczywistości i zrozumieć określone jego cechy. Tworzenie modelu i jego stopień skomplikowania może się zmieniać w zależności od etapów inwestycji, a zatem również stopnia rozpoznania struktur i warunków fizycznych panujących w przestrzeni podziemnej. W zależności od celu, rzeczywisty obiekt może być przedmiotem innej analizy, dlatego różne modele mogą go reprezentować. Podczas modelowania wyszczególnia się cechy obiektu, które są ważne w zakresie opisu obiektu lub interesujących jego zachowań, a pomija elementy, które nie są istotne. Do podstawowych trudności występujących przy modelowaniu należą duża złożoność rzeczywistych obiektów i zjawisk mających miejsce i nierzadko brak odpowiednich danych pozwalających w pełni je opisać.

Wśród modeli można wyróżnić modele statyczne (stacjonarne) i dynamiczne (niestacjonarne) (rys. 80–86). **Modele statyczne** przedstawiają obiekt, którego badane parametry nie ulegają zmianie w czasie (kiedy model osiągnął stan równowagi). Przykładami mogą być: model strukturalny, model parametryczny, model termiczny górotworu, model naprężeń tektonicznych w górotworze. **Modele dynamiczne** natomiast przedstawiają ewolucję jakiegoś obiektu lub zjawiska w czasie. Przykładem modelu dynamicznego jest symulacja procesu zatłaczania substancji/odpadów do podziemnego zbiornika i jego wpływu na zmianę ciśnienia i temperatury, czy procesu zaciskania kawern. Na potrzeby etapów tworzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, wyróżniono modele dynamiczne podstawowe i złożone (tab. 62). **Modele dynamiczne podstawowe** są wykonywane w celu wyboru optymalnej lokalizacji lub dla uzyskania koncesji. **Modele dynamiczne złożone** są tworzone na użytek operatora i mają jak najdokładniej przewidywać wszelkie aspekty funkcjonowania obiektu. W tabeli 62 podano terminy, które zaleca się stosować w zakresie modelowania i modeli w nawiązaniu do wymagań rozporządzenia w sprawie dokumentacji geologiczno-inżynierskich (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016).

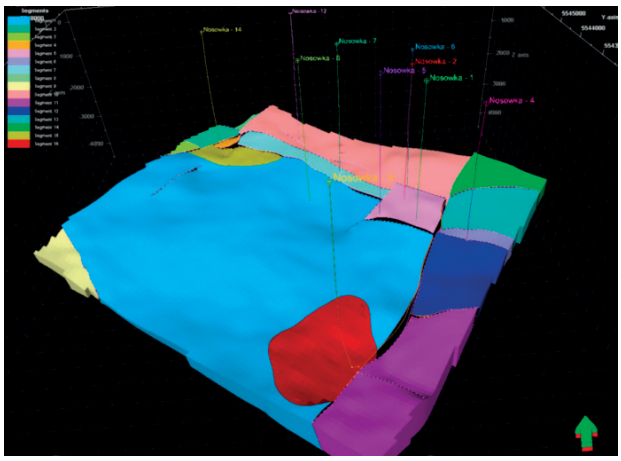
Do największych zalet modelowania numerycznego należy zaliczyć możliwość stosunkowo łatwego testowania wpływu wielu parametrów na działanie modelu, bez potrzeby ponownego budowania obiektu czy definiowania zjawiska. W konsekwencji pozwala to rozwiązać szerokie spektrum problemów bez konieczności podejmowania ryzyka ponoszenia zbędnych kosztów, które często są bardzo wysokie. Modelowanie numeryczne znajduje zastosowanie na każdym etapie badań i działalności podziemnych magazynów/składowisk. Dotyczy to fazy koncepcyjnej, fazy konstrukcyjnej i eksploatacyjnej, a także fazy likwidacji. Celem modelowania jest więc:

- opis strukturalny i analiza właściwości górotworu;
- analiza i wybór najkorzystniejszej lokalizacji magazynów/składowisk, a także lokalizacji otworów zatłaczających;
- określenie możliwości funkcjonowania magazynu/składowiska i wyboru optymalnego wariantu jego budowy i eksploatacji;
- optymalizacja kosztów procesu budowy i działalności podziemnych magazynów/składowisk;
- ocena zmian zachodzących w górotworze i w magazynie/składowisku, w tym np.:
  - rozprzestrzeniania się zatłaczanej substancji,
  - zmian stanu skupienia lub zajścia reakcji chemicznych,
  - zmian ciśnienia, naprężeń i temperatury;
- ocena bezpieczeństwa działalności magazynu/składowiska;

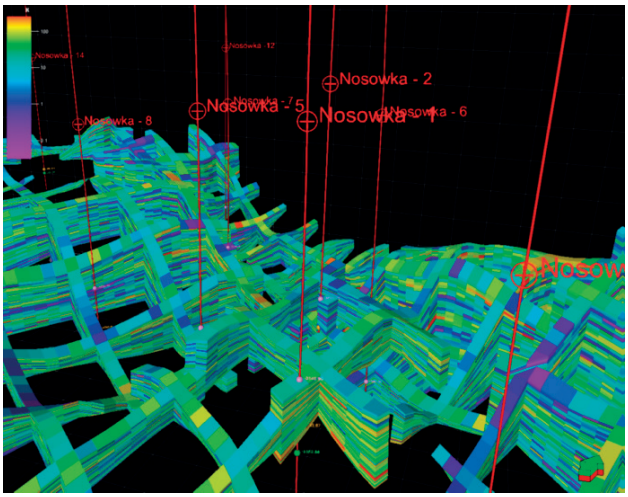
Tabela 62

Zalecana terminologia do stosowania w zakresie modeli i modelowania

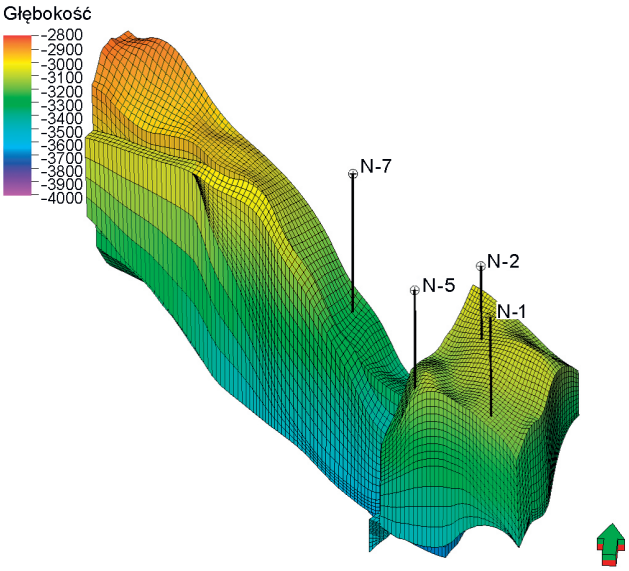
Model	Modelowanie
Model statyczny (np. model parametryczno-strukturalny)	Modelowanie statyczne (np. modelowanie parametryczno-strukturalne)
Model dynamiczny podstawowy	Modelowanie dynamiczne podstawowe
Model dynamiczny złożony	Modelowanie dynamiczne złożone



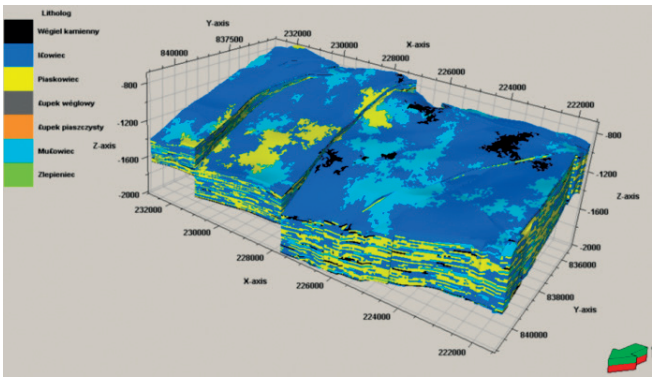
Rys. 80. Model strukturalny złoża ropy naftowej Nosówka (Sowiżdżał, Stadtmuller za Wójcicki i in., 2013)



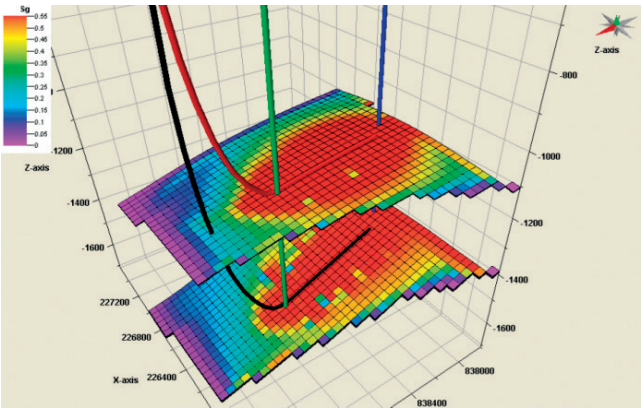
Rys. 81. Wizualizacja przestrzennego rozkładu przepuszczalności (przewyższenie ×2). Model parametryczny złoża ropy naftowej Nosówka (Sowiżdżał, Stadtmuller za Wójcicki i in., 2013)



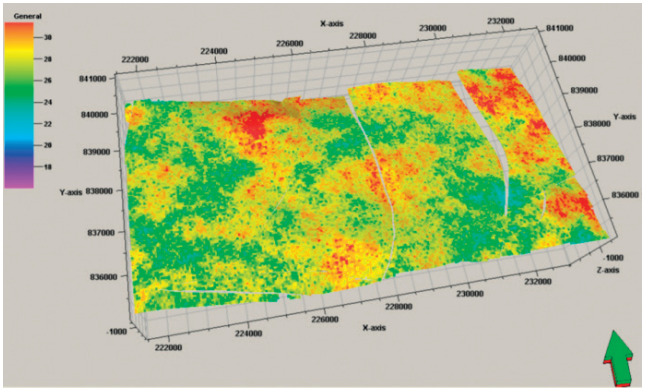
Rys. 82. Model dynamiczny złoża ropy naftowej Nosówka (widok 3D) (Szot i in. za Wójcicki i in., 2013)



Rys. 83. Model statyczny litologiczny złoża węgla kamiennego w rejonie Pawłowice-Mizerów na obszarze GZW (Chećko i in. za Wójcicki i in., 2013)



Rys. 84. Rozkład nasycenia fazą gazową w szczelinach po roku iniekcji w pokładzie 405 i 510. Model dynamiczny złoża węgla kamiennego w rejonie Pawłowice-Mizerów na obszarze GZW (Urych, Jureczka za Wójcicki i in., 2013)

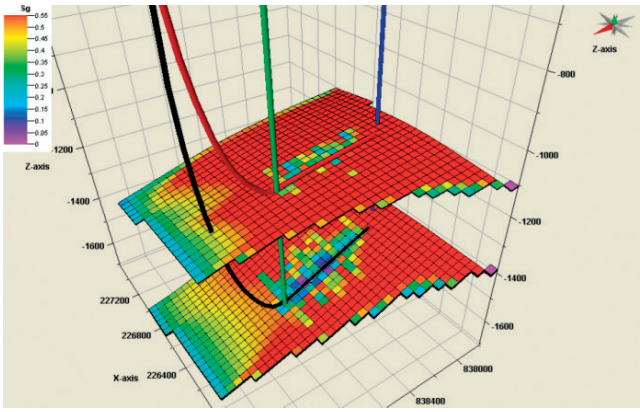


Rys. 85. Rozkład zawartości części lotnych w pokładzie 405. Model statyczny parametryczny złoża węgla kamiennego w rejonie Pawłowice-Mizerów na obszarze GZW (Chećko i in. za Wójcicki i in., 2013)

– ocena ryzyka wycieku substancji i wskazanie miejsc o podwyższonym ryzyku;
– prognozowanie ewentualnego wpływu funkcjonowania magazynu/składowiska na środowisko naturalne;
– prognozowanie zachowania się kawern/wyrobisk w długiej perspektywie czasu.

Modelowanie numeryczne, a także przeprowadzane na ich podstawie analizy i oceny, powinny być uwzględniane w dokumentach powstających w trakcie procesu inwestycyjnego (patrz: cz. II, rozdz. 1). Modele numeryczne są wymogiem w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej tworzonej na potrzeby (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) (tab. 63):
– podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji – PMS;
– podziemnego składowania odpadów – PSO;
– podziemnego składowania dwutlenku węgla – CO_2.

Zwraca uwagę fakt, że wymagania dla CO_2 są bardzo rozbudowane w porównaniu do tych dla substancji i odpadów.



Rys. 86. Rozkład nasycenia fazą gazową w szczelinach po pięciu latach od zakończenia iniekcji w pokładzie 405 i 510. Model dynamiczny złoża węgla kamiennego w rejonie Pawłowice-Mizerów na obszarze GZW (Urych, Jureczka za Wójcicki i in., 2013)

Tabela 63

Zalecenia odnośnie modelowania i modeli do dokumentacji geologiczno-inżynierskich

Rodzaj DGI	Wymagania rozporządzenia w zakresie modelowania (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016)	Komentarz
1	**2**	**3**
DGI-PMS	opis sposobu lub wariantowych symulacji wtłaczania substancji przewidzianych do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania, wykonanych przy uwzględnieniu modelowania cyfrowego zmian zachodzących w górotworze w wyniku tego wtłaczania	założenia do wariantowego modelowania dynamicznego, na poziomie modelu koncepcyjnego, ze wskazaniem źródła danych dla konstrukcji modelu strukturalno-parametrycznego oraz dla sformułowania warunków brzegowych modeli; wskazanie stopnia sprzężenia modelu przepływów z modelem geomechanicznym
DGI-PSO	opis sposobu lub wariantowych symulacji wtłaczania odpadów przewidzianych do podziemnego składowania, wykonanych przy uwzględnieniu modelowania cyfrowego zmian zachodzących w górotworze w wyniku tego wtłaczania	założenia do wariantowego modelowania dynamicznego, na poziomie modelu koncepcyjnego, ze wskazaniem źródła danych dla konstrukcji modelu strukturalno-parametrycznego oraz dla sformułowania warunków brzegowych modeli; wskazanie stopnia sprzężenia modelu przepływów z modelem geomechanicznym
DGI-CO2	opis trójwymiarowego statycznego geologicznego modelu górotworu dla podziemnego składowiska dwutlenku węgla i kompleksu składowania, nadkładu i obszarów połączonych hydraulicznie oraz płynów z wykorzystaniem komputerowych symulatorów zbiorników oraz ocenę niepewności związanej z każdym z parametrów wykorzystanych do skonstruowania modelu, wynikającą z różnych scenariuszy dla każdego z parametrów i wyliczenia odpowiednich granic przedziału ufności, a także ocenę wszelkiej niepewności związanej z modelem, który powinien ilustrować: a) budowę geologiczną fizycznej pułapki, b) właściwości geomechaniczne i geochemiczne oraz właściwości przepływu płynów w kompleksie składowania i w nadkładzie (skała stropowa, skały uszczelniające, skały porowate i przepuszczalne) oraz otaczających formacji, c) charakterystykę systemu spękań i obecności wszelkich antropogenicznych dróg migracji i wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, d) powierzchniowy i pionowy zasięg kompleksu składowania, e) objętość porów, w tym rozkład porowatości, f) stan wyjściowy rozkładu płynów w górotworze, g) inne istotne właściwości kompleksu składowania	założenia do wariantowego modelowania statycznego pojemności składowiska ze wskazaniem źródła danych dla konstrukcji modelu strukturalno-parametrycznego ze szczególnym uwzględnieniem parametrów kolektorów i uszczelnień oraz struktur tektonicznych modyfikujących przestrzeń porową kolektorów i przepuszczalność uszczelnień
	opis modelowania dynamicznego, obejmującego szereg symulacji czasowych procesu zatłaczania dwutlenku węgla do podziemnego składowiska dwutlenku węgla w komputerowym symulatorze kompleksu składowania, z wykorzystaniem trójwymiarowego statycznego geologicznego modelu górotworu	założenia do wariantowego modelowania dynamicznego, na poziomie modelu koncepcyjnego, ze wskazaniem źródła danych dla konstrukcji modelu strukturalno-parametrycznego oraz dla sformułowania warunków brzegowych modeli; wskazanie stopnia i sposobu sprzężenia modelu przepływów z modelem geomechanicznym

Tabela 63 cd.

1	2	3
cd. DGI-CO2	charakterystyka dynamicznego zachowania się dwutlenku węgla podczas składowania z uwzględnieniem co najmniej: a) potencjalnej wydajności zatłaczania i inicjalnych właściwości strumienia dwutlenku węgla, b) efektywności modelowania procesów połączonych (sposobu interakcji pomiędzy pojedynczymi zmiennymi w symulatorze), c) reakcji chemicznych zatłoczonego dwutlenku węgla z minerałami kompleksu składowania, które są widoczne w modelu, d) wykorzystywania symulatora zbiornika, w tym wielokrotnych symulacji w celu potwierdzenia odpowiednich wyników modelu, e) symulacji krótkoterminowych i długoterminowych w celu określenia prognozy zachowania się dwutlenku węgla po okresie dziesiątek i tysięcy lat, w tym prędkość rozpuszczania się dwutlenku węgla w wodzie	przedstawienie wyników modelowania dynamicznego krótko i długoterminowego we wskazanych zakresach, obejmujących preferowaną konfigurację otworów zatłaczających i preferowane tempa zatłaczania; model taki powinien uwzględniać przepływy wielofazowe, rozpuszczanie substancji w solance oraz reakcje chemiczne z minerałami budującymi kolektor
cd. DGI-CO2	analiza wyników modelowania dynamicznego w zakresie: a) ciśnienia i temperatury w kompleksie składowania jako funkcji wydajności zatłaczania dwutlenku węgla i sumarycznej ilości, b) powierzchniowego i pionowego rozprzestrzenienia dwutlenku węgla w funkcji czasu, c) charakteru przepływu dwutlenku węgla w zbiorniku, w tym jego przemian fazowych, d) mechanizmów i ilości zatrzymywania dwutlenku węgla, z uwzględnieniem punktów wycieku i dwutlenku węgla poza kompleks składowania, a także uszczelnienia poprzecznego i pionowego, e) drugorzędnych systemów uszczelniających w całym kompleksie składowania, f) pojemności składowania i gradientów ciśnienia w składowisku, g) ryzyka powstawania szczelin w formacji geologicznej tworzącej podziemne składowisko dwutlenku węgla i w nadkładzie, w szczególności w warstwie uszczelniającej, h) ryzyka przedostania się wycieku dwutlenku węgla do skały stropowej, i) ryzyka wycieku dwutlenku węgla, w tym przez nieczynne lub nieodpowiednio zabezpieczone otwory wiertnicze, j) prędkości migracji dwutlenku węgla w zbiorniku, k) prędkości uszczelnienia spękań, l) zmian składu chemicznego płynów złożowych w kompleksie składowania i późniejszych reakcji, w tym zmian pH i składu mineralnego, a także włączenia modelu reakcji w celu oceny ich skutków, m) przemieszczania wypychanych zatłaczaną substancją płynów, n) zwiększonej aktywności sejsmicznej i wyniesienia powierzchni terenu	przedstawienie wariantowych wyników modelowania we wskazanych zakresach; modele powinny charakteryzować rozprzestrzenianie się chmury CO_2 w czasie oraz udział poszczególnych mechanizmów pułapkowania CO_2 w czasie i przestrzeni. Sprzężenie modelu przepływów z modelem geomechanicznym pozwala na śledzenie zmian ciśnienia i naprężenia górotworu wzbudzane rozprzestrzenianiem CO_2; aby można było przewidywać procesy szczelinowania i reaktywacji uskoków, model geomechaniczny powinien uwzględniać początkowy stan współczesnych naprężeń w górotworze oraz występowanie głównych uskoków; na podstawie wariantowego modelowania powinno się wskazać rozwiązania preferowane o najniższym stopniu ryzyka zjawisk niepożądanych
	opis przeprowadzonych wielokrotnych symulacji na potrzeby oceny wrażliwości na zmienność przyjętych do analizy parametrów, które powinny być wykonane na zmiennych parametrach trójwymiarowego statycznego geologicznego modelu górotworu, a także na zmiennych funkcjach i założeniach przyjętych w modelowaniu dynamicznym, przy czym każda duża wrażliwość powinna zostać odnotowana w ocenie ryzyka	raport z wariantowych wyników modelowania powinien przede wszystkim wskazywać zjawiska stanowiące największe ryzyko dla składowiska, lokalizować miejsca najbardziej wrażliwe i wskazywać rozwiązania redukujące ryzyko wystąpienia zjawisk niepożądanych

DGI – dokumentacja geologiczno-inżynierska; DGI-PMS – dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji; DGI-PSO – dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania odpadów; DGI-CO2 – dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla

5.1. METODY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

Modelowanie numeryczne to szukanie przybliżonych rozwiązań dla określonych, matematycznie sformułowanych problemów przy użyciu komputerów. Modelowanie numeryczne stanowi jednak ostatni element procesu ogólnie zwanego modelowaniem. W procesie tym wyróżnia się trzy główne etapy (np. Rojek, 2007), schematycznie przedstawione na rysunku 87. Pierwszy etap obejmuje stworzenie **modelu koncepcyjnego (fizycznego)**, który w uproszczony sposób przedstawia badany układ złożony z obiektu podziemnego i jego otoczenia oraz uwzględnia jego najważniejsze cechy i zależności. W drugim etapie określa się **model matematyczny**, który w formie równań matematycznych opisuje badany proces czy zjawisko. Trzecim etapem jest stworzenie **modelu numerycznego (modelu obliczeniowego)**, w którym określa się w jaki sposób będą programowane i wykonywane obliczenia w zależności od przyjętej metody numerycznej.

Poniższe rozdziały przedstawiają bardziej szczegółowo trzy etapy tworzenia modelu numerycznego i powiązane z tym zagadnienia, w kontekście analizy problemów dotyczących podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, składowania odpadów i dwutlenku węgla.

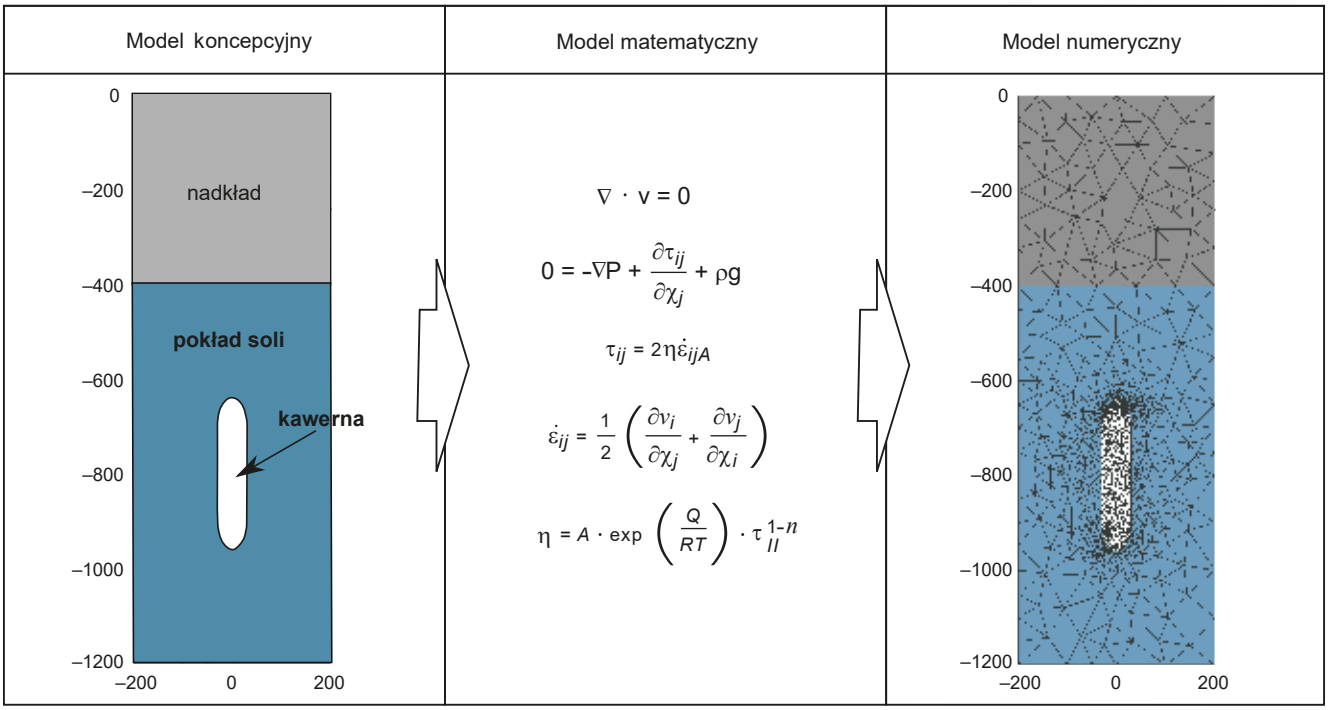
5.1.1. Model koncepcyjny

Model koncepcyjny powinien zawierać ogólne założenia, definicje oraz uproszczenia, które pozwalają na dostatecznie dokładny opis badanego procesu lub zjawiska. Uproszczenia mogą dotyczyć wielu elementów, np.:

– geometrii badanego obiektu;
– cech fizycznych, mechanicznych oraz chemicznych elementów ośrodka;
– możliwości zachodzenia procesów mechanicznych i chemicznych w ośrodku;
– obecności niejednorodności ośrodka;
– wymiarowości badanego ośrodka (1D, 2D lub 3D);
– zależności od czasu;
– wystąpienia innych czynników, np. źródeł ciepła.

Budowa modelu powinna opierać się na wiedzy na temat budowy geologicznej górotworu lub jego elementu oraz procesów, będących przedmiotem analizy. Dodatkowych informacji mogą dostarczyć wyniki badań terenowych lub laboratoryjnych. Wybór uproszczeń zależy przede wszystkim od rodzaju rozwiązywanego problemu, a jego celem jest uchwycenie istoty tego problemu. Co więcej, zmniejszenie poziomu złożoności modelu pozwala na szybszą analizę problemu i sprawniejsze testowanie różnych rozwiązań. Budowa modelu koncepcyjnego często sprowadza się do kompromisu pomiędzy próbą wiernego opisu badanego problemu czy zjawiska a prostotą i przejrzystością, która ułatwia weryfikację budowanego modelu oraz zwiększa jego użyteczność. W praktyce tworzenie modeli numerycznych jest wielostopniowe. Zwykle zaczyna się od analizy uproszczonych modeli, które następnie poddaje się różnym testom, wstępnej weryfikacji i kalibracji (rozdz. 5.1.3.4, 5.1.3.5). Dopiero w kolejnych krokach stopniowo wprowadza się dodatkowe elementy, które zwiększają poziom złożoności modelu, dzięki czemu lepiej odzwierciedla się rzeczywisty problem.

Początkowe, uproszczone modele geometryczne mogą wręcz bazować na wyidealizowanych kształtach, np. podczas analizy naprężeń wokół kawerny nierzadko przyjmuje się kulisty lub owalny kształt kawern w jednorodnym ośrodku.



Rys. 87. Schemat ilustrujący etapy modelowania numerycznego na przykładzie tworzenia modelu zaciskania kawern

Złożoność geometrii w trzech wymiarach można również zredukować wykorzystując symetrię modelu. Złożone modele, będące trójwymiarową reprezentacją danego obiektu, opisujące jego budowę strukturalną, noszą nazwę **modeli strukturalnych**. Modele zawierające natomiast informacje na temat przestrzennego rozłożenia wybranego parametru to **modele parametryczne**, np. model porowatości i model przepuszczalności. Budowę takich modeli opisuje się odpowiednio jako **modelowanie geologiczne struktur** i **modelowanie parametryczne**. Modele te są zwykle efektem integracji danych geologicznych, mechanicznych, hydrotermalnych, sedymentologicznych, geofizycznych (m.in. sejsmicznych, otworowych, grawimetrycznych), inżynieryjno-złożowych itp.

W zależności od celu modelowania, charakteru obiektów i modelowanych procesów stosuje się różne skale przestrzenne. Dobór skali może wpływać na stopień szczegółowości odwzorowania poszczególnych elementów i potrzebę uwzględnienia różnych czynników czy procesów, które są dla danej skali istotne. W przypadku opisywanych obiektów można wyróżnić trzy podstawowe skale:

- mikroskala (np. skala zbliżona do prób laboratoryjnych), gdzie badane są np. efektywne parametry skał;
- mezoskala (np. skala przyotworowa), gdzie można badać np. bezpośredni wpływ obiektów na otoczenie;
- makroskala (np. skala górotworu lub regionalna), gdzie bada się ogólny wpływ obiektów na ośrodek skalny.

5.1.2. Model matematyczny

Budowa modelu matematycznego to sformułowanie problemu (związku przyczynowo-skutkowego), jaki jest przedmiotem analizy, w postaci równań matematycznych (algebraicznych, różniczkowych i całkowych). Poziom skomplikowania modelu matematycznego jest związany ze złożonością każdego z analizowanych procesów fizycznych, a także ich sprzężeniem. Równania matematyczne zwykle oparte są na prawach i aksjomatach fizyki (np. równania ruchu i równowagi oraz zasady zachowania bilansu wielkości fizycznych takich jak masa, energia i pęd), zależności geometryczne, a także związki konstytutywne. Na etapie budowy modelu matematycznego formułuje się także warunki brzegowe i początkowe w systemie oraz wyznacza wartości parametrów (patrz: tab. 65 str. 215).

Do szeroko wykorzystywanego w modelowaniu numerycznym związku konstytutywnego należy prawo materiałowe, które określa zależność odkształcenia badanego materiału od wpływu przyłożonych naprężeń w zależności od temperatury, ciśnienia, wielkości ziaren, czasu itp. Prawa konstytutywne są określone dla każdego z badanych ośrodków. Dobór odpowiednich praw oraz poprawne oznaczenie wartości stałych dla tych praw są bardzo istotnym elementem otrzymania wiarygodnych wyników modelowania. Przykłady praw materiałowych wykorzystywanych w kontekście podziemnego magazynowania i składowania przedstawiono w rozdziale 5.4.10.

Dla pełnego i jednoznacznego zdefiniowania problemu konieczne jest określenie również warunków brzegowych i początkowych. Warunki brzegowe można ustalić przez przypisanie wartości rozwiązania lub wartości pochodnych na brzegu obszaru obliczeniowego, a także na granicach ośrodków. Warunki brzegowe nie tylko zapewniają jednoznaczność otrzymanego rozwiązania, lecz także mogą decydować o przebiegu procesu wewnątrz rozpatrywanego obszaru. Określenie warunków brzegowych w modelu to m.in. uwzględnienie sił zewnętrznych takich jak grawitacja oraz poziome przemieszczenia lub naprężenia na krawędziach modelu, gradient ciśnienia porowego (osobno dla wydzielonych segmentów modelu). Do skalibrowania warunków brzegowych mogą być wykorzystywane wyniki punktowych pomiarów i obliczeń naprężeń oraz profili naprężeń dla otworów wiertniczych. Warto pamiętać, że źle dobrane warunki brzegowe mogą być istotnym źródłem błędu w modelu.

5.1.3. Model numeryczny

Modele matematyczne w postaci równań całkowych lub różniczkowych opisują ośrodek ciągły. Niektóre z modeli, dla określonych warunków początkowych i brzegowych, mają rozwiązania analityczne. Niestety, dla wielu modeli analizujących procesy fizyczne w ośrodkach skalnych o skomplikowanej geometrii otrzymanie takich rozwiązań jest kłopotliwe lub czasami niemożliwe. Dlatego w praktyce częściej wykorzystuje się metody numeryczne, które pozwalają na otrzymanie rozwiązania (często przybliżonego) w dyskretnych punktach (w określonych punktach o skończonej liczbie). W wyniku dyskretyzacji, na podstawie modelu matematycznego, budowany jest model numeryczny, gdzie funkcje ciągłe modelu matematycznego przekształcane są w funkcje dyskretne (tj. przyjmujące określone wartości dla określonych punktów w przestrzeni i/lub czasie). W efekcie otrzymuje się algebraiczny układ równań o skończonej liczbie niewiadomych. Sposób, w jaki dokonuje się przekształcenia modelu matematycznego w numeryczny, związany jest z wykorzystywaną metodą numeryczną.

5.1.3.1. Metody numeryczne

Do najczęściej stosowanych metod numerycznych należą: metoda różnic skończonych (FDM – ang. *finite difference method*), metoda elementów skończonych (FEM – ang. *finite element method*), metoda objętości skończonych (FVM – ang. *finite volume method*), metoda elementów dyskretnych (DEM – ang. *discrete element method*) (tab. 64). Stosuje się też metody hybrydowe, będące kombinacją wymienionych metod. Ze względu na fakt, że metody DEM oraz metody hybrydowe rzadko są wykorzystywane w modelowaniu zagadnień związanych z podziemnym magazynowaniem i składowaniem, nie będą on przedmiotem dalszej analizy.

Zbudowany na etapie dyskretyzacji układ równań zostaje rozwiązany za pomocą specjalnej funkcji, czyli solvera. W przypadku analizy problemów nieliniowych zachodzi potrzeba zdefiniowania dodatkowych parametrów takich jak liczba iteracji itp.

Tabela 64

Charakterystyka wybranych metod numerycznych

Metoda	FDM	FEM	FVM
Opis	równania różniczkowe są zastępowane odpowiednimi ilorazami różnicowymi (przez zastosowanie rozwinięcia poszukiwanej funkcji w szeregu Taylora wokół punktów węzłowych)	w metodzie wykorzystuje się przybliżenia całkowe równań różniczkowych i opiera się na tzw. słabym rozwiązaniu (ang. *weak form solution*); domenę obliczeniową dzieli się na skończoną liczbę elementów; rozwiązanie na każdym elemencie przybliżane jest przez liniową kombinację funkcji kształtu; obliczenia dokonuje się na węzłach siatki	metoda wykorzystuje całkowe postacie równań różniczkowych i opiera się na tzw. silnej postaci równania (ang. *strong form solution*); domenę dzieli się na objętości kontrolne, dla których dokonuje się obliczeń; w najprostszym wariancie w każdej objętości kontrolnej wszystkie wartości są uśrednione w jej środku
Zalety	schemat łatwy do zaprogramowania; sprawdza się przy regularnych siatkach i prostych geometriach; możliwe wysokie rzędy aproksymacji przestrzennej	często stosowana w praktyce; doskonała do analizy problemów dotyczących m.in. mechaniki ośrodków ciągłych; łatwa do stosowania dla siatek niestrukturalnych; możliwość uzyskania rozwiązania dla obszarów o skomplikowanych kształtach; możliwe wysokie rzędy aproksymacji przestrzennej	stosowana do zagadnień z m.in. mechaniki płynów, w tym do przepływów turbulentnych; łatwa do stosowania dla siatek niestrukturalnych; możliwość uzyskania rozwiązania dla obszarów o skomplikowanych kształtach
Wady	nie nadaje się do siatek niestrukturalnych; problem z implementacją w przypadku złożonych geometrii; możliwe problemy ze stabilnością kodu	nie nadaje się do analizy przepływów turbulentnych oraz deformacji kruchej; charakteryzuje się zwiększonym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową komputera	praktycznie brak możliwości stosowania wyższych rzędów aproksymacji przestrzennej (co przekłada się na dokładność metody); konieczność stosowania siatek obliczeniowych wysokiej jakości

5.1.3.2. Dyskretyzacja przestrzenna

W wyniku dyskretyzacji w metodach FEM, FDM i FVM badany obiekt jest dzielony za pomocą dyskretnych punktów (węzłów) siatki na mniejsze podobszary zwane elementami. W modelach numerycznych używa się różnego rodzaju siatek obliczeniowych: w modelach 1D – elementy liniowe, w modelach 2D – elementy trójkątne lub czworokątne, a w modelach 3D – elementy czworościenne, sześciościenne oraz pryzmatyczne. Tworzenie siatki numerycznej jest istotnym elementem otrzymania poprawnych obliczeń. Ważne jest, żeby siatka miała rozkład równomierny i tworzyła elementy o podobnym rozmiarze. Na ogół większa liczba węzłów pozwala na otrzymanie dokładniejszych i bardziej szczegółowych rozwiązań, jednak znacznie obniża to wydajność obliczeń numerycznych. Z tego powodu tworzy się siatki o zmiennej wielkości elementów, a w obszarze, gdzie jest wymagane dokładniejsze rozwiązanie, używa się większej liczby elementów. W takim podejściu należy zadbać, aby przejście między obszarami o różnej gęstości siatki było gładkie. Zdegenerowane elementy siatki, czyli takie, w których pojawiają się mocno wydłużone elementy, obniżają jakość prowadzonych obliczeń.

5.1.3.3. Dyskretyzacja czasowa

W przypadku modelowania procesów w czasie, obliczenia są wykonywane dla określonych, dyskretnych punktów w czasie. Wymaga to wprowadzenia dyskretnej skali czasu, gdzie wartości oddalone są od siebie o pewien skończony krok czasowy (odstęp czasu). Istnieją metody i algorytmy, gdzie krok czasowy jest stały lub zmienny. Wielkość kroku czasowego powinna być dobrana z wielką ostrożnością, żeby zredukować błędy numeryczne. Z reguły większa liczba kroków czasowych (mniejszy odstęp czasu) zwiększa dokładność otrzymanych rozwiązań, chociaż wydłuża czas obliczeń.

Do najczęściej stosowanych algorytmów do całkowania po czasie należą metody: Eulera, Ruge-Kutty i Cranka-Nicholsona. Przy wyborze metody warto brać pod uwagę jej dokładność, stabilność i zbieżność. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że niektóre z metod do wykonania jednego kroku potrzebują kilku iteracji, co w konsekwencji wydłuża czas obliczeń.

5.1.3.4. Weryfikacja i walidacja modelu

Modelowanie numeryczne zwykle pozwala uzyskać przybliżone rozwiązanie badanego problemu, dlatego ważnym elementem w modelowaniu jest określenie dokładności otrzymanego rozwiązania. Wiarygodność wyników zależy od wielu czynników, m.in. od dokładności rozpoznania geologicznego, w tym określenia wielu jego parametrów, zasadności dokonanych uproszczeń rzeczywistego problemu i zdolności odzwierciedlenia systemów naturalnych w przyjętych modelach koncepcyjnych i matematycznych oraz od przyjętych metod numerycznych. Błędy mogą powstać zarówno więc na etapie budowy modelu koncepcyjnego (błąd danych wejściowych), jak i matematycznego oraz numerycznego.

Przez porównanie uzyskiwanych numerycznie wyników z wynikami rozwiązań analitycznych, dostępnymi dla szczególnych przypadków danego zagadnienia, lub wynikami eksperymentalnymi, można dokona walidacji i zweryfikować poprawność wykorzystywanego modelu numerycznego do badanego problemu.

5.1.3.5. Kalibracja

Ocena wiarygodności modelu numerycznego opiera się na analizie jego błędów. Istotnym źródłem błędów, oprócz przyjętych uproszczeń przy tworzeniu modelu koncepcyjnego i błędów powstających na etapie modelowania matematycznego i numerycznego, jest wiarygodność przyjętych parametrów. Zweryfikowany i skalibrowany model numeryczny może być więc bezwartościowy przy błędnie określonych danych wejściowych. Nie zawsze jednak istnieje możliwość określenia wszystkich parametrów, które dodatkowo mogą zmieniać się w przestrzeni i/lub czasie. Ważnym więc elementem przy budowie modelu jest jego kalibracja, której celem jest oszacowanie parametrów nieznanych lub obarczonych błędem. Kalibracji można dokonać na podstawie dowolnej mierzalnej wielkości, gdzie wyniki modelowania numerycznego są porównywane z wynikami otrzymywanymi eksperymentalnie lub *in situ*.

Kalibrację można wykonać stosując metodę tzw. prób i błędów (ang. *trial-and-error*) lub w wyniku modelowania odwrotnego (ang. *backward modelling*). Metoda modelowania odwrotnego daje wiele korzyści, jednak ze względu na swoją złożoność nie jest często stosowana. Zwykle przyjmuje się szereg określonych założeń i dokonuje się iteracyjnego doboru parametrów aż do uzyskania wyniku zbieżnego z obserwacjami.

5.2. PARAMETRY MODELOWANIA

Znajomość parametrów modeli matematycznych jest kluczowa dla poprawnego odwzorowania analizowanych procesów. Niektóre z parametrów można określić bezpośrednio metodami laboratoryjnymi czy terenowymi, a niektóre można wyznaczyć w sposób pośredni na podstawie relacji między innymi parametrami. Relacje te mogą mieć jednak charakter czysto empiryczny. Tabela 65 przedstawia zestaw parametrów często wykorzystywanych do budowy modelu matematycznego procesów związanych z podziemnym bezzbiornikowym magazynowaniem substancji i podziemnym składowaniem odpadów i dwutlenku węgla.

5.3. OPROGRAMOWANIE

Analizę numeryczną można przeprowadzić z wykorzystaniem ogólnodostępnego oprogramowania komercyjnego. Programy mogą być przeznaczone do określonych zagadnień, czego przykładem są programy do modelowania: strukturalno-parametrycznego (SKUA-GOCAD, Petrel), przepływów (ModFlow), procesu ługowania kawern (WinUrbo.Net), rozkładu temperatur w kawernach (Kaga) czy geomechanicznego kawern (WinKAGA). Istnieją także pakiety oprogramowania do przeprowadzania analiz w różnych dziedzinach fizycznych i mechanicznych, takie jak: COMSOL, FLAC, FLAC3D, ABAQUS, ANSYS, które mogą zostać przystosowane do badań z zakresu podziemnego magazynowania i składowania. Wykorzystanie istniejącego już oprogramowania ma wiele zalet ze względu na obecność m.in. przyjaznego interfejsu oraz wielu funkcji dostosowanych do specyfiki wybranych problemów. W przypadku programów typu *open source* istnieje możliwość pełnego dostosowania programu na własne potrzeby. Właściwości różnych kodów są przedmiotem specjalistycznych opracowań i charakteryzują się dynamicznym rozwojem. W wielu programach komercyjnych istnieje także możliwość modyfikacji fragmentów kodów lub modelu, zwiększając ich elastyczność i funkcjonalność. Z tego powodu, wybór odpowiedniego oprogramowania powinien być oparty na możliwościach programu przy rozwiązywaniu badanego zagadnienia. W przypadku prowadzenia działań niestandardowych alternatywą może być również rozwinięcie własnego oprogramowania.

Dodatkowo należy mieć jednak na uwadze, że zestaw parametrów używanych do modelowania przepływów uwarunkowany jest w znacznej mierze możliwościami kodów numerycznych. Trzeba pamiętać, że **zestaw parametrów rozpoznawanych na etapie charakterystyki obiektu powinien być w najwyższym możliwym stopniu skoordynowany z wymaganiami kodu numerycznego, którym będzie wykonana analiza**.

5.4. ZAGADNIENIA PRAKTYCZNE MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

Poniżej przedstawiono zagadnienia związane z aplikacją modelowania numerycznego w kontekście podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania odpadów oraz dwutlenku węgla.

5.4.1. Modelowanie strukturalne i strukturalno-parametryczne dla obiektów podziemnych

Budowa przestrzennych, statycznych modeli przedstawiających wybraną strukturę geologiczną lub obrazujących rozkład określonych parametrów jest zwykle efektem integracji różnych źródeł informacji i danych, m.in.:

- materiały archiwalne, np. mapy wyrobisk górniczych, przekroje geologiczne, archiwalne opracowania, dokumentacje, wyniki badań wykonanych na rzecz planowanego obiektu, dane z eksploatacji złoża;
- wyniki badań laboratoryjnych, np. wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, moduł Younga, współczynnik Poissona, wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie, pełzanie, charakterystyka petrograficzna, właściwości chemiczne;
- wyniki badań terenowych, np. deformacje powierzchni terenu;
- wyniki badań *in situ* górotworu, np. pomiary konwergencji kawern, wyrobisk górniczych.

Zgromadzone dane archiwalne oraz wyniki badań powinny zostać wykorzystane do konstrukcji szczegółowego modelu strukturalnego i do przestrzennego określenia rozkładu jego parametrów w jak największym stopniu. Proces integracji jest złożony ze względu na różne źródła danych

Tabela 65

Parametry często uwzględniane przy tworzeniu modelu matematycznego

Obiekt	Parametry			Symbol [jednostka]
Górotwór (formacja/struktura, w której planuje się zlokalizować magazyn/składowisko)	geometryczne	układ przestrzenny warstw głębokość zalegania miąższość obecność nieciągłości (spękania, uskoki) i niejednorodności		dowolne [m]
	fizyczne	gęstość naprężenia ciśnienie ściśliwość		ρ [kg m^{-3}] lub [Mg m^{-3}] σ, τ [MPa] p [Pa] lub [bar] β [Pa^{-1}]
	mechaniczne	sprężyste	moduł Younga (ściskanie) moduł ścinania (moduł Kirchhoffa) (ścinanie) moduł Helmholtza (ściśliwość objętościowa) współczynnik Poissona	E_d [GPa] G_d [GPa] K_d [GPa] ν_d [–]
		lepkie	pełzanie	μ [Pa s]
		plastyczne/ wytrzymałościowe	wytrzymałość na ściskanie wytrzymałość na rozciąganie wytrzymałość na ścinanie	σ_c, R_c [MPa] σ_t, R_r [MPa] τ_t, R_t [MPa]
	chemiczne	ciężar właściwy rozpuszczalność		γ [N m^{-3}] α [nm^3 m^{-3}xPa]
	termiczne	temperatura gradient geotermalny przewodność cieplna rozszerzalność cieplna pojemność cieplna dyfuzyjność cieplna		T [°C] lub [K] T [°C m^{-1}] lub [K m^{-1}] λ, k [W K^{-1} m^{-1}] α [K^{-1}] C [J K^{-1}] α [m^2 s^{-1}]
	hydrauliczne	porowatość przepuszczalność		p [–] K [m^2] lub k_p [D]
Magazyn/składowisko	geometryczne	kolektor	wielkość i kształt warstwy kolektorskie warstwy osłonowe, izolacyjne	dowolne [m]
		kawerna	wielkość i kształt głębokość posadowienia miąższość półki stropowej/spągowej grubość filarów międzykomorowych i bocznych	
	operacyjne i techniczne	liczba cykli napełniania i opróżniania komory długość cyklu zatłaczania i odbioru minimalne i maksymalne ciśnienie substancji magazynowej średnice zarurowania		N [–] T [dzień] p_{min}, p_{max} [Pa] lub [bar] [in]
Magazynowana substancja/ składowany odpad/ składowany dwutlenek węgla	fizyczne	gęstość ciśnienie ściśliwość		ρ [kg m^{-3}] lub [Mg m^{-3}] p [Pa] lub [bar] β [Pa^{-1}]
	chemiczne	ciężar właściwy rozpuszczalność		γ [N m^{-3}] α [nm^3 m^{-3}xPa]
	termiczne	temperatura przewodność cieplna rozszerzalność cieplna pojemność cieplna dyfuzyjność cieplna		T [°C] lub [K] λ, k [W K^{-1} m^{-1}] α [K^{-1}] C [J K^{-1}] α [m^2 s^{-1}]

często charakteryzujących obiekt w punkcie, w różnych skalach przestrzennych: mikro-, mezo- i makroskali.

Modelowanie w mikroskali wykonuje się dla określenia właściwości próbek skalnych. W tej skali można symulować efektywną przepuszczalność heterolitów i kompleksów spękanych (również pod obciążeniem) oraz efektywność pułapek strukturalnych, uwarunkowanych zróżnicowaniem mikrofacjalnym.

W mezoskali można modelować np. efekty geochemiczne i geodynamiczne związane ze zmianami ciśnienia i temperatury wokół otworu. Można analizować np. ograniczanie przepuszczalności przez strącanie minerałów w przestrzeni porowej na skutek schłodzenia, jak i wzrost przepuszczalności przez rozwieranie spękań podwyższonym ciśnieniem. Zjawiska te mają podstawowe znaczenie dla utrzymania tempa zatłaczania oraz dla szczelności strefy przyotworowej.

Modelowanie w makroskali może obejmować zachowanie chmury zatłaczanego płynu (substancja składowana lub magazynowana w stanie ciekłym, gazowym lub nadkrytycznym) z uwzględnieniem różnych typów pułapkowania, w tym rozpuszczania i konwekcji.

Należy uwzględnić możliwość prowadzenia pełnego modelowania funkcjonowania obiektu, co najmniej w dwóch skalach – przyotworowej i całego obiektu. Modele strefy przyotworowej o większej rozdzielczości pozwalają na lepszą kontrolę zjawisk towarzyszących zatłaczaniu, takich jak gwałtowny wzrost ciśnienia czy wahania temperatury przy otworze zatłaczającym.

W przypadku dużego obiektu, o promieniu oddziaływania na środowisko znacznie przekraczającym rozmiary obiektu, można uwzględnić również skalę regionalną modelu. Dla płytkich wychodni kolektora w dużej odległości od obiektu można się spodziewać wypychania solanek i podniesienia zasolenia w warstwach płytszych. W przypadku modeli składowania płynów na dużą skalę, modelowania powinny obejmować nie tylko fazę eksploatacji obiektu (ang. *operational phase*), lecz także setki lat po zakończeniu eksploatacji (ang. *post-operational phase*).

Struktura modelu konstruowana jest najczęściej na podstawie zdjęcia sejsmicznego i jego dowiązania do otworów wiertniczych. Bazując na korelacji pomiędzy tymi dwoma rodzajami danych, tworzony się model prędkości fali sejsmicznej dla danego obiektu, na podstawie którego dokonuje się konwersji czasowo-głębokościowej, służącej przedstawieniu pierwotnego czasowego modelu sejsmicznego w jednostkach głębokości. Krok ten można pominąć, o ile podczas przetwarzania i obrazowania danych sejsmicznych wykonano migrację głębokościową przed składaniem. W sytuacji skomplikowanej budowy geologicznej lub znacznej poziomej zmienności prędkości fal sejsmicznych (np. w utworach cechsztynu), podejście to umożliwia dużo lepsze odwzorowanie struktur. Dla zdjęcia sejsmicznego 3D o dobrej jakości model strukturalny jest zwykle dobrze określony. W przypadku profili sejsmicznych 2D dokładność takiego modelu można podnieść przez użycie danych grawimetrycznych, magnetycznych, innych danych geofizycznych, istniejących interpretacji archiwalnych itd.

W praktyce konstrukcja modelu strukturalnego polega najczęściej na interpretacji zdjęć sejsmicznych skorelowanych ze stratygrafią określoną w otworach wiertniczych. W efekcie otrzymuje się zestaw powierzchni „zawieszonych" w przestrzeni 3D, reprezentujących uskoki oraz horyzonty sejsmiczne (czyli np. spągi czy stropy formacji o kontrastujących litologiach). Powierzchnie te tworzą model struktury geologicznej, dzieląc przestrzeń (górotwór) na bryły reprezentujące poszczególne warstwy geologiczne (np. jednostki chrono- czy litostratygraficzne). Model ten ma za zadanie odzwierciedlić budowę geologiczną badanego obszaru, w szczególności położenie nieciągłości, w tym powierzchni erozyjnych i uskoków. Jego prawidłowa konstrukcja ma kluczowy wpływ na predyktywność modelowań dynamicznych (np. modelowania przepływu zatłaczanego do składowiska płynu) wykonywanych na bazie modelu statycznego.

W następnym kroku konstrukcyjnym tworzy się siatkę przestrzenną, czyli dyskretyzuje się model do wymaganej rozdzielczości, umożliwiającej efektywne określenie przestrzennego rozkładu parametrów ośrodka, zarówno parametrów ciągłych (np. porowatość, przepuszczalność czy temperatura), jak i nieciągłych (np. litologia czy facje). Kluczowym elementem tego procesu jest właściwe określenie charakteru horyzontów tworzących model strukturalny (np. zgodne, erozyjne, transgresywne), od tego bowiem zależy kształt siatki (np. równoległa do stropu lub spągu), który z kolei ma podstawowy wpływ na rozprzestrzenianie się interpolowanych parametrów. Geometria siatki przestrzennej powinna w jak najwierniejszy sposób odzwierciedlać położenie warstw skalnych w górotworze.

Ostatnim krokiem w konstrukcji modelu statycznego jest modelowanie parametryczne, tj. przypisanie węzłom siatki przestrzennej wartości parametrów opisujących właściwości skał i płynów obecnych w górotworze. Wartości te zazwyczaj znane są (z pewnym przybliżeniem) tylko w otworach wiertniczych, rozprzestrzenienie ich zatem w całej objętości modelu wymaga zastosowania odpowiednich metod ekstrapolacji. Ze względu na oboczne zróżnicowanie parametrów fizycznych warstw geologicznych, potrzebna jest jak najbardziej wszechstronna ich weryfikacja w przestrzeni 3D. Może się ona odbywać na podstawie danych z wielu otworów wiertniczych, których niestety zwykle nie ma w dostatecznej liczbie na etapie charakterystyki obiektu. Niekiedy parametry modelu trzeba ekstrapolować na podstawie danych z jednego otworu wiertniczego. Dzięki analizie właściwości petrofizycznych kompleksów ze zdjęcia sejsmicznego 3D do pewnego stopnia można kontrolować zmienność oboczną właściwości kolektorów i uszczelnień scharakteryzowanych w otworach wiertniczych.

Dobrej jakości dane sejsmiczne 3D, w połączeniu z danymi otworowymi, pozwalają na wyznaczenie parametrów sprężystych ośrodka. Jest to zadaniem interpretacji ilościowej danych sejsmicznych z wykorzystaniem inwersji sejsmicznej. Inwersja sejsmiczna umożliwia wyznaczenie współczynników odbicia fal P i S oraz gęstości, bazując na amplitudach rejestrowanych fal. Najczęściej stosowaną metodą jest tzw. inwersja symultaniczna, która wykorzystuje

dane przed składaniem (ang. *pre-stack*). W większości przypadków, na jej podstawie można wyznaczyć impedancję fali P (*Zp*), impedancję fali S (*Zs*) oraz gęstość. Gęstość jest przy tym parametrem wyznaczonym z największą niepewnością (ze względu na zależność od dużych kątów odbicia – powyżej 40°, które rzadko można zarejestrować w praktyce). Inwersja może być realizowana w wariancie deterministycznym (ang. *model-based)* lub geostatystycznym. Zaletą tego drugiego podejścia, oprócz lepszej rozdzielczości, jest automatyczne wyznaczenie błędów uzyskanych parametrów. Na podstawie znanych relacji łączących właściwości mechaniczne i prędkości fal P i S, na podstawie wyników inwersji sejsmicznej, wyznaczyć można izotropowe, dynamiczne moduły, takie jak moduł Younga (E_d) czy moduł ścinania (G_d). Moduły te dzięki kalibracji za pomocą badań wytrzymałościowych próbek skalnych, mogą zostać przeskalowane do modułów statycznych. Ze względu jednak na wspomnianą niską wiarygodność odtworzenia gęstości, w praktyce przemysłowej często stosuje się transformację wynikowych impedancji *Zp* i *Zs* do iloczynu stałej Lamégo (L_{st}) i gęstości objętościowej (ρ_b) oraz modułu ścinania (G_d) równemu stałej (μ) i gęstości objętościowej (ρ_b) (metoda $L_{st} - \mu - \rho_b$):

$$L_{st} \cdot \rho_b = Zp^2 - 2Zs^2$$

$$\mu \cdot \rho_b = Zs^2$$

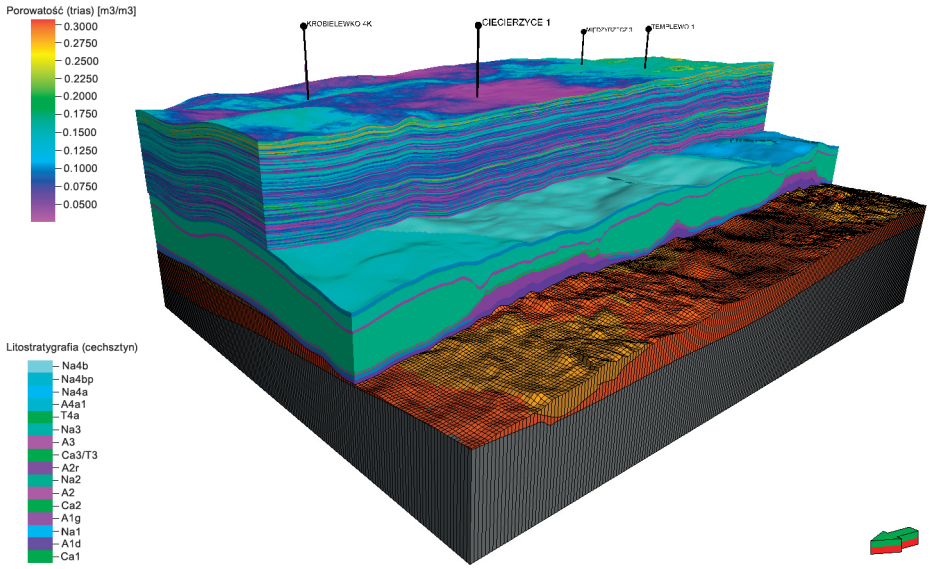
Parametr $L_{st} \cdot \rho_b$ jest czuły na zmiany nasycenia przestrzeni porowej (określa nieściśliwość), podczas gdy parametr $\mu \cdot \rho_b$ wskazuje na litologię.

Immanentną cechą interpretacji struktur geologicznych jest ograniczona ilości danych z dużych głębokości. W takich przypadkach stosuje się techniki modelowania statystycznego dla wyboru najbardziej prawdopodobnego kształtu struktury, rozkładu szczelin w obrębie obiektu (ang. *discrete fracture network* – DFN) lub dystrybucji parametrów petrofizycznych. Niektóre parametry, które można ekstrapolować na podstawie danych otworowych i zdjęcia sejsmicznego 3D oraz wyników pozostałych badań podano w tabeli 65. Ekstrapolacja parametrów w modelu może mieć charakter deterministyczny (np. kriging i jego liczne odmiany) lub stochastyczny polegający na rozrzuceniu parametrów w obrębie modelu zgodnie ze spodziewanym ich rozkładem (określonym np. przez diagram proporcji facji), w wyniku czego w poszczególnych punktach siatki otrzymuje się wartości prawdopodobieństwa wystąpienia określonej wartości parametru (metody geostatystyczne).

Należy wspomnieć, że takie parametry jak efektywna przepuszczalność lub efektywne właściwości sprężyste w skali większej niż próby laboratoryjne mogą również być przedmiotem modelowania (ang. *effective media theory*).

Przykład modelu strukturalno-parametrycznego przedstawiono na przykładzie bloku Gorzowa (rys. 88).

Na podstawie szczegółowych modeli kolektora (skał zbiornikowych), obejmujących zwłaszcza rozkład efektywnej przepuszczalności i jej anizotropii, można zoptymalizować rozstawienie otworów zatłaczających, a dla magazynów również otworów wydobywczych. W wypadku zastosowania otworów o odcinkach poziomych szczególną rolę odgrywa anizotropia przepuszczalności w poziomie. Ma ona wyjątkowe znaczenie w kolektorach szczelinowych lub z dużym udziałem otwartych szczelin, które w magazynach mogą znacznie przyspieszyć rozprowadzanie i odbieranie płynu z kolektora. W przypadku składowisk duże znaczenie może mieć rozdzielenie kolektora uszczelnieniami podrzędnej rangi o ograniczonej ciągłości. W zależności od modeli można je uwzględnić w formie dyskretnych przewarstwień lub jako anizotropię VTI (pion/poziom). Zatłaczanie na niższym



Rys. 88. Model strukturalno-parametryczny fragmentu bloku Gorzowa

W dolnej części modelu widoczne utwory karbonu (szary), seria wulkaniczna czerwonego spągowca (pomarańczowy) i seria osadowa czerwonego spągowca (żółty). Część środkowa przedstawia poziomy litostratygraficzne cechsztynu, część górna to rozkład porowatości w triasie. Zielono-czerwona strzałka wskazuje kierunek północy. Widok zawiera również wybrane otwory wiertnicze (mat. PIG-PIB)

poziomie pozwoli wówczas zwiększyć rolę pułapkowania strukturalnego i rozpuszczania w solance podczas wędrówki płynu zatłaczanego ku spągowi uszczelnienia głównego.

5.4.2. Modelowanie przepływów w warstwach zbiornikowych

Celem modelowania przepływów jest sprawdzenie jak zachowa się obiekt w różnych wariantach jego eksploatacji, a zwłaszcza: określenie rozprzestrzeniania się zatłoczonego płynu w czasie, określenie efektów geochemicznych reakcji płynu z solanką i matrycą skalną, badanie gradientów wzrostu ciśnienia na skutek zatłaczania płynów, zlokalizowanie miejsc o największym prawdopodobieństwie wycieku płynu z kolektora, określenie roli zapasowych uszczelnień, zbadanie warunków szczelności otworów zatłaczających, zoptymalizowanie warunków zatłaczania płynu na powierzchni. W trakcie eksploatacji obiektu wyniki symulacji można porównywać z realnymi parametrami zatłaczania (np. ciśnienie i tempo zatłaczania) oraz z efektami monitoringu i na tej podstawie kalibrować parametry modelu, w celu podwyższenia jego zdolności predykcyjnych.

Dla zdefiniowania warunków brzegowych modelu przepływów potrzebny jest stan zerowy rozkładu ciśnień w analizowanych kolektorach i uszczelnieniach. Przyjmuje się, że warunki te są ustalone, gdyż występowanie naturalnych przepływów świadczy o wycieku płynów porowych do miejsc o niższym ciśnieniu, czyli domyślnie – ku powierzchni. Jeżeli przepływ naturalny odbywa się w tempie istotnym dla warunków funkcjonowania obiektu, to jest uważany za znaczący czynnik ryzyka, który może eliminować daną inwestycję. Model uwzględnia, że płyn zatłaczany jest w obręb obiektu w danym tempie, pod zadanym ciśnieniem i w określonej temperaturze. Wielkość tych parametrów jest wypadkową potrzeb inwestora, zakładanych instalacji powierzchniowych (np. siły i wydajności pomp), właściwości hydrodynamicznych płynu i konstrukcji otworu.

Wyróżnić można następujące opcje modelowania:
- przepływów wielofazowych, w których różne płyny mogą zmieniać stan skupienia;
- przepływów reaktywnych, w których zatłaczany płyn wchodzi w reakcje chemiczne z płynem porowym i ewentualnie skałą (ang. *coupled reactive transport model*);
- przepływów sprzężonych z efektami geomechanicznymi, w których zatłaczaniu płynów towarzyszą zmiany ciśnień wzbudzające odkształcenia i naprężenia w skałach.

5.4.3. Modelowanie przepływów w warstwach zbiornikowych sprzężone z geomechaniką

Modelowanie przepływów/transportu w przestrzeni porowej i szczelinowej na dużych głębokościach sprzężone z geomechaniką rozwinięte zostało przez firmy naftowe na użytek symulacji eksploatacji węglowodorów. Podobne podejście można wykorzystać do modelowania efektów zatłaczania substancji (płynów, gazów) w przestrzeń porową.

Zatłaczanie płynów do kolektora powoduje wzrost ciśnienia, który wpływa z kolei na zmiany naprężeń efektywnych w skałach. W przypadku zatłaczania płynów o dużej objętości może dojść również do podniesienia powierzchni terenu. Zjawiska te powodują wzrost ryzyka rozszczelnienia obiektu lub wystąpienia niepożądanych zjawisk geodynamicznych. Po fazie zatłaczania gradienty ciśnień spadają, a wraz z nimi ryzyko składowania płynów. Struktura modeli kolektorów i uszczelnień jest wspólna dla modelu przepływów i geomechanicznego. Każdy z modeli wyróżnia się zestawem parametrów go konstytuujących i warunków brzegowych modelowania. Sprzężenie modelu przepływów z geomechaniką jest niezbędne do określenia możliwości rozszczelnienia spękań w obrębie uszczelnienia i ryzyka uruchomienia uskoków. Takie symulacje wskazują na bezpieczny zakres tempa zatłaczania płynu.

Sprzężenie przepływów z geomechaniką należy do trudnych problemów numerycznych i może być realizowane na wiele sposobów. Sprzężenie takie może być pełne (ang. *fully coupled models*), a wówczas jest to jeden model, w którym oba problemy są rozwiązywane wspólnie za pomocą rozbudowanych funkcji stanu ośrodka. Przy obecnym zaawansowaniu kodów komercyjnych, do symulowania dużych obiektów, o dużym stopniu komplikacji struktury, tak zaawansowane podejście nie jest stosowane. Sprzężenie odbywa się iteracyjnie przez przeliczenie efektów odziaływania przepływów na stan naprężeń i/lub odwrotnie, modyfikacji przepuszczalności przez zmienione naprężenia. Niektóre symulatory mają możliwość tylko jednokierunkowego sprzężenia, np. oddziaływania przepływów i ciśnień na naprężenia, bez wstecznej modyfikacji parametrów przepływu.

5.4.4. Modelowanie geomechaniczne zatłaczania płynów do warstw zbiornikowych

Zatłaczanie płynu do górotworu powoduje podwyższenie ciśnienia porowego, które zmienia układ efektywnych naprężeń w skale. Może to prowadzić do zainicjowania szczelinowania hydraulicznego zarówno kolektora, jaki i uszczelnienia, a także otwierania lub poślizgu wzdłuż spękań tektonicznych i uskoków. Do symulacji tych procesów konieczne jest wypełnienie modelu parametrami mechanicznymi dla jednorodnych kompleksów skalnych, opisanie sieci struktur tektonicznych oraz wyznaczenie wielkości naprężeń. Składniki te są podstawą konstrukcji geomechanicznego modelu górotworu 3D.

Głównymi celami modelowania jest sprawdzanie mechanicznej integralności uszczelnienia oraz stabilności struktur tektonicznych. Wyniki modelowania geomechanicznego, po iteracyjnym sprzężeniu z modelem przepływów, wykorzystywane są do stopniowej modyfikacji modelu przepływów.

Ze względu na ograniczenie rozdzielczości modeli całego obiektu, wynikającej z kosztów obliczeniowych, nie wszystkie wyniki pomiarów mogą zostać wprowadzone bezpośrednio do modelu. Dlatego pomierzone w laboratorium lub obliczone z karotaży wiertniczych właściwości mechaniczne powinny zostać przeskalowane do rozmiarów elementów modelu numerycznego. Może się to odbywać np. na zasadzie

ich uśredniania w zakresie jednostek jednorodnych mechanicznie lub za pomocą modeli własności efektywnych (ang. *effective media theory*). W przypadku drobnych, seryjnych struktur tektonicznych można je uwzględnić jako właściwość mechanicznego kontinuum modelu np. w postaci anizotropii właściwości mechanicznych i/lub przepuszczalności lub elementów plastyczności. Tylko niektóre większe uskoki i spękania mogą zostać uwzględnione bezpośrednio jako nieciągłości modelu mechanicznego.

W przypadku, gdy stan naprężeń jest bliski dynamicznej równowagi uskoków, niewielkie zmiany ciśnienia mogą doprowadzić do reaktywacji uskoków o określonej orientacji. Wówczas lokalny stan i kierunek naprężeń jest w znacznym stopniu uwarunkowany lokalizacją względem reaktywowanych uskoków. Obecnie, większość komercyjnych kodów do modelowania przestrzeni podziemnej nie ma możliwości zaimplementowania anizotropii lub plastyczności w analizach mechanicznych. Funkcje takie mają natomiast popularne pakiety inżynierskie, jak np. ANSYS lub ABACUS. Przy obserwowanym szybkim postępie badań w zakresie geomechaniki należy spodziewać się wyższego stopnia integracji modeli mechanicznych, naprężeniowych i strukturalnych.

Parametry używane w modelu mechanicznym obejmują: stałe sprężystości (moduł ścinania, Younga i współczynnik Poissona), kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, współczynnik Biota (określający przełożenie ciśnień porowych na naprężenia efektywne) oraz statyczny współczynnik tarcia na nieciągłościach modelu (tab. 65).

Szczegółowy model geomechaniczny uszczelnienia głównego i zapasowego służy głównie analizie ryzyka eksploatacji obiektu w różnych wariantach technologicznie wzbudzonych ciśnień porowych, uwarunkowanych intensywnością zatłaczania i docelową objętością zatłaczanego płynu. Problemy geomechaniczne trzeba niekiedy rozpatrywać w skali bardziej szczegółowej niż przepływy w obrębie obiektu, zatem należy uwzględnić szczegółową analizę najbardziej zagrożonych fragmentów modelu i przeprowadzenie modelowania z większą rozdzielczością dla fragmentów modelu głównego.

5.4.5. Modelowanie szczelności uskoków warstw zbiornikowych i uszczelniających

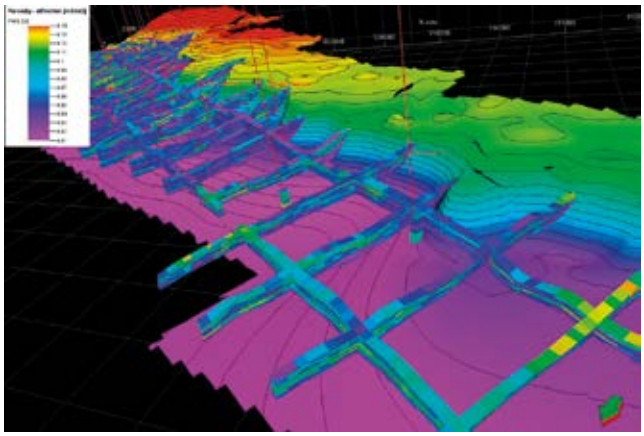
W dużej objętości badanych obiektów zazwyczaj występują uskoki. Poza przemieszczeniem warstw skalnych, powierzchnie uskokowe cechują się wystąpieniem specyficznych skał uskokowych, powstałych na skutek rozdrobnienia skał (kataklaza), wyciskania i mieszania minerałów ilastych z rozciętych uskokiem kompleksów oraz ich wtórnej mineralizacji. Procesy te zwykle, jeżeli występują, wzmagają właściwości uszczelniające stref uskokowych (ang. *fault sealing properties*), dlatego mogą w znacznym stopniu warunkować przepływy w kolektorach. Mimo znacznych komplikacji związanych ze składem i miąższością stref uskokowych, przemysł naftowy wypracował standardy analiz właściwości uszczelniających tych stref. Ogólnie przyjmuje się założenie, że właściwości uszczelniające uskoków mają dwa komponenty:

- związany z przeciwstawieniem w poprzek uskoku warstw o różnej przepuszczalności (ang. *juxtaposition seal*);
- związany z powstawaniem skał uskokowych (ang. *fault gouge seal*) przy założonych modelach mieszania skał (Bobek i in., 2021).

Analizę uszczelnień uskokowych można prowadzić zarówno na podstawie danych otworowych – modele 1D, jak i danych sejsmicznych, a zwłaszcza sejsmiki 3D – modele 3D. Podstawowymi danymi wejściowymi do modeli są: geometria uskoków, rozkład przemieszczeń na powierzchniach uskoków i profile promieniowania gamma charakteryzujące rozkład minerałów ilastych w obrębie poszczególnych warstw rozciętego uskokiem kompleksu. Takie analizy mają zwykle charakter jakościowy i trudno ich bezpośrednio użyć w modelowaniu przepływów. Jednak, bazując na profilach gamma uzupełnionych testami laboratoryjnymi, można wyznaczyć profil przepuszczalności, który daje podstawy dla analiz ilościowych. Na podstawie wyników takich analiz w modelach eksploatacji obiektu można uwzględnić strefy uskokowe jako bariery dla przepływu.

5.4.6. Modelowanie struktur węglowodorowych na obiekty podziemne

Powszechnym sposobem podziemnego magazynowania substancji lub składowania odpadów jest budowa obiektów podziemnych w sczerpanych lub częściowo wyeksploatowanych formacjach złóż węglowodorów. Adaptacja struktur węglowodorowych na obiekty podziemne zazwyczaj polega na reinterpretacji danych zebranych podczas eksploatacji złoża oraz dostosowaniu parametrów złoża na potrzeby pracy obiektu podziemnego (Reinisch, 2000). W tym celu wykorzystuje się modele statyczne (strukturalne, strukturalno-parametryczne – rys. 89) (patrz: rozdz. 5.4.1) oraz modele dynamiczne, opracowane na potrzeby eksploatacji złoża, na których prowadzi się symulacje parametrów pracy obiektu



Rys. 89. Model porowatości efektywnej złoża gazy ziemnego Paproć (https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WynikiPrac/II-18ipods.pdf)

podziemnego oraz modeluje zachodzące w nim procesy (rozdz. 5.4.2–5.4.4) (Economides, Nolte, 2000). Przygotowane modele są zazwyczaj co pewien czas aktualizowane z uwzględnieniem danych z poprzedniego okresu pracy obiektu podziemnego.

Geologiczny statyczny model podziemnego obiektu w formacjach złóż węglowodorów zazwyczaj jest budowany w specjalistycznym programie (np. Petrel, IHS Markit Kingdom) na podstawie danych z otworów wiertniczych i profilowania sejsmicznego 2D, 3D, 4D wykonanego na obszarze, na którym znajduje się obiekt podziemny. Model dynamiczny również opracowuje się w specjalistycznym programie (np. Eclipse, Petrel). Do budowy modelu dynamicznego wykorzystuje się różne dane wejściowe w zależności od rodzaju obiektu podziemnego, w tym m.in.: statyczny model geologiczny, właściwości petrofizyczne skał warstwy zbiornikowej, właściwości geomechaniczne masywu skalnego, ciśnienia szczelinowania, pierwotne dane dotyczące złoża, pierwotne zasoby węglowodorów w złożu, charakterystykę substancji/odpadów, charakterystyki płynów złożowych, parametry odwiertów zlokalizowanych w obrębie obiektu podziemnego, dane o ciśnieniach i strumieniu natężenia przepływu dla poszczególnych odwiertów, dane dotyczące zatłoczonych i odebranych ilości płynów złożowych (Woźniak, Zawisza, 2011; Bujok i in., 2021). Dane do modelu statycznego i dynamiczne zbiera się i opisuje w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (patrz: cz. II, rozdz. 6). Po uwzględnieniu w modelu danych wejściowych opracowuje się wariantowe symulacje (scenariusze) pracy obiektu podziemnego, np. wielokrotnego przepływu płynów złożowych przez skałę zbiornikową i ich wpływu na przepuszczalność i porowatość, geochemicznego modelowania kinetyki reakcji woda–skała–substancja/odpad (Such, 2020).

5.4.7. Modelowanie geomechaniczne dla komór skalnych i wyrobisk kopalń podziemnych[54]

W celu określenia stateczności górotworu wykorzystuje się rozmaite analityczne i numeryczne metody oparte na mechanice skał. Prowadzone analizy zapewniają uzyskanie dostatecznie dużej bazy danych, żeby móc wybrać ze zbioru alternatywnych rozwiązań to podejście, które jest najbardziej korzystne z punktu widzenia zapewnienia stateczności górotworu, przy jednoczesnym utrzymaniu funkcjonalności obiektu i jego ekonomicznej efektywności. Traktując wybrane podejście jako podstawę do budowy modelu numerycznego kopalni, można stwierdzić, czy proponowane rozwiązanie ma zapewnić ogólną stateczność kopalni lub też nie może jej zapewnić.

Z uwagi na to, że górotwór może być zbudowany zarówno ze skał zwięzłych o wysokiej wytrzymałości, jak i ze skał zwietrzałych, w skrajnych przypadkach z gruntów, o bardzo niskiej wytrzymałości, analiza stateczności wyrobisk górniczych sprowadza się do analizy ryzyka towarzyszącego wielu różnym mechanizmom niestateczności. Do analizy stateczności kopalń można wykorzystywać następujące sposoby modelowania:

- modelowanie górotworu jako ciało ciągłe (continuum) metodami elementów skończonych i brzegowych oraz metodą różnic skończonych, przy założeniu, że nie może ono zostać rozerwane, co także znaczy, że nie może zostać podzielone na odrębne fragment przez działające obciążenie. Wyjątkiem pod tym względem są wbudowane w model nieciągłości (np. uskoki) w formie wewnętrznego brzegu lub powierzchniowych elementów kontaktowych, z przypisaną im sztywnością i wytrzymałością. Ryzyko pojawienia się niestateczności w modelowanym górotworze jest szacowane za pomocą rozmaitych wskaźników, takich jak np. prędkości przyrostu plastycznego odkształcenia, wartości współczynnika lub zapasu bezpieczeństwa;
- modelowanie górotworu jako ciała nieciągłego (discontinuum) metodą elementów odrębnych, która to metoda zakłada, że górotwór jest zbudowany z dokładnie zdefiniowanego przestrzennie układu odrębnych elementów (bloków skalnych, cząstek, odspojonych fragmentów), które na siebie oddziałując, mogą się wzajemnie odseparować (pojawienie się pęknięcia lub szczeliny);
- modelowanie górotworu jako obiektu hybrydowego, co oznacza, że w bezpośrednim otoczeniu modelowanego wyrobiska wykorzystuje się metodę elementów odrębnych, natomiast obszary znajdujące się w większej odległości są modelowane metodami continuum. Takie podejście w większości przypadków istotnie zwiększa efektywność prowadzonych obliczeń.

Sposób modelowania dobiera się w zależności od charakterystyki budowy geologicznej nadkładu oraz formacji, w której drąży się wyrobiska górnicze.

5.4.8. Modelowanie geomechaniczne dla kawern solnych

Wiele opisanych w poprzednich rozdziałach aspektów modelowania magazynów i składowisk w ośrodkach porowatych dotyczy również analogicznych modeli dla struktur solnych. W rozdziale tym przedstawiono specyfikę modelowania takich obiektów w strukturach solnych, które ze względu na właściwości mechaniczne i chemiczne soli dają możliwość tworzenia w niej szczelnych kawern o znacznych rozmiarach. Tworzenie takich przestrzeni na dużych głębokościach powoduje szereg problemów strukturalnych i mechanicznych. Do najbardziej atrakcyjnych struktur solnych, znajdujących się na relatywnie małych głębokościach, należą wysady solne, jednak ich wewnętrzna struktura jest skomplikowana. Pierwszym problemem związanym z budową modeli kawern w wysadach jest zbudowanie dostatecznie szczegółowego i wiarygodnego modelu strukturalno-parametrycznego. W przypadku kawern w złożach pokładowych soli problem ten jest mniej złożony ze względu na zwykle

[54] Tekst opracowano na podstawie publikacji: PYTEL W., 2018 – Modelowanie numeryczne i pomiary dołowe w badaniach stateczności wyrobisk górniczych prowadzonych w Zakładzie Mechaniki Górotworu KGHM CUPRUM – CBR. CUPRUM – Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, 4, 89: 97–116.

klarowne rozwarstwienie cyklotemów, chociaż i w takich przypadkach należy dobrze rozpoznać geometrię ew. barier anhydrytowych. Dla poduszek solnych zaburzenia struktury pokładowej są dużo mniejsze niż w wysadach, a co za tym idzie, model strukturalny może być lepiej scharakteryzowany np. pracami sejsmicznymi. W przypadku kawern osobne modele muszą być wykonane dla procesów ich ługowania i dla ich eksploatacji.

Celem modelowania geomechanicznego jest – dla określonych warunków geologicznych i geomechanicznych górotworu (rozkładu przestrzennego struktur i wartości parametrów) – wyznaczenie optymalnego kształtu i głębokości posadowienia kawern oraz doboru najkorzystniejszych warunków i sposobu magazynowania substancji czy składowania odpadów, żeby spełnić wymagane potrzeby magazynowe czy depozycyjne oraz kryteria bezpieczeństwa. Do najważniejszych geomechanicznych kryteriów, jakie muszą być spełnione, należą:

– stabilność krótkotrwała (kryteria wytrzymałościowe);
– spełnienie kryteriów wytrzymałości na deformacje o charakterze dylatancyjnym;
– spełnienie kryteriów wytrzymałości na naprężenia rozciągające;
– nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości tempa konwergencji;
– nieprzekroczenie dopuszczalnych wartości osiadania nadkładu nad kawerną/wyrobiskiem.

Wartości tempa konwergencji określają maksymalną głębokość posadowienia kawerny. Wraz ze wzrostem głębokości rośnie temperatura i ciśnienie litostatyczne w górotworze. Oba czynniki wpływają na większe tempo pełzania soli, co powoduje szybszą konwergencję kawern i w efekcie utratę objętości. Tempo konwergencji jest częściowo ograniczone przez ciśnienie hydrostatyczne magazynowanej substancji w przypadku substancji ciekłych lub przez utrzymanie podwyższonego ciśnienia w przypadku gazu. Wysokie ciśnienie może jednak doprowadzić do powstania spękań i w efekcie utraty szczelności. Dla kawern gazowych szczególnie istotnym aspektem jest dobór minimalnego i maksymalnego ciśnienia magazynowania, które zapewniłyby stabilność i szczelność kawern, a także optymalną pojemność roboczą. Kawerna o tym samym kształcie usytuowana na większej głębokości może pomieścić więcej gazu. W przypadku magazynów substancji ciekłych, które są nieściśliwe, pojemność zależy jedynie od jej objętości. W praktyce głębokość posadowienia kawern waha się między ok. 200–2500 m. Magazyny substancji gazowych są budowane na większych głębokościach, żeby zwiększyć zdolności magazynowe kawerny. Magazyny substancji ciekłych są budowane płycej, w celu zminimalizowania kosztów pompowania substancji podczas napełniania (Kunstman i in., 2009).

Dobór kształtu kawerny może być zdeterminowany przez warunki geologiczne w górotworze (rys. 90). Zwykle jednak pionowo wydłużony elipsoidalny, gruszkowy czy cylindryczny kształt kawerny jest uważany za optymalny pod względem stabilności. Niektóre z modeli numerycznych wskazują, że poszerzenie kształtu komory w górnej jej części może być korzystniejsze (Cyran, Kowalski, 2021). Dodatkową zaletą projektu takiego kształtu jest zwiększenie objętości magazynowej kawerny.

Niektóre modele uwzględniają zjawiska termodynamiczne zachodzące w obrębie kawerny i w otaczającym ją górotworze. Zjawiska te powinno się wziąć pod uwagę np. podczas projektowania i eksploatacji magazynu gazu w kawernach (Serbin, 2013). Magazyny te funkcjonują pod zmiennym ciśnieniem, które wpływa na temperaturę magazynowanego gazu. Zatłaczanie gazu powoduje sprężenie i wzrost temperatury, natomiast opróżnianie komory powoduje rozprężanie i jej spadek. Dodatkowo temperatura w kawernie zmienia się pod wpływem wymiany ciepła między gazem ziemnym a górotworem. Zmiany te i ich dynamika bezpośrednio wpływają na tempo konwergencji komory.

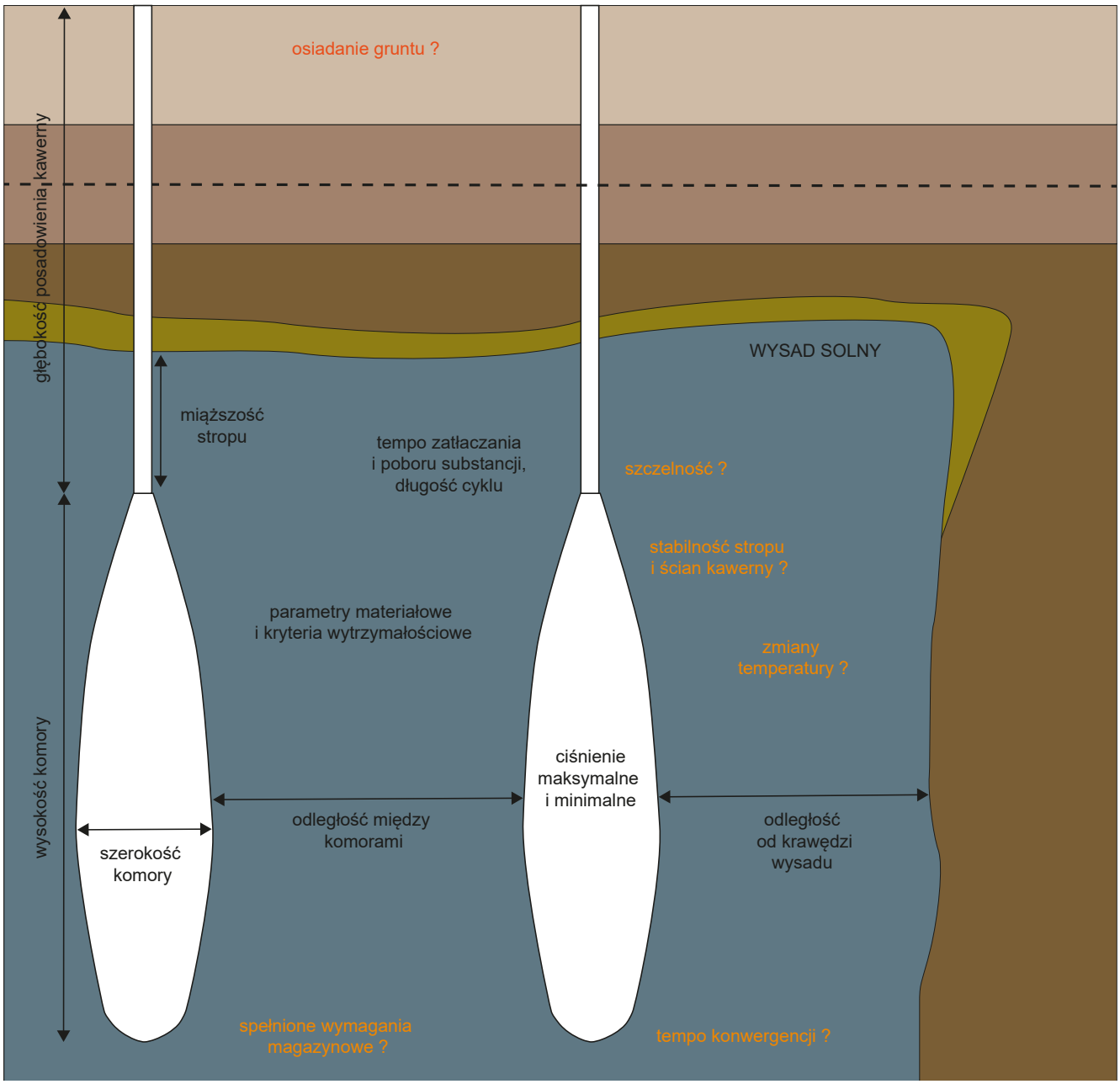
5.4.9. Modelowanie procesu ługowania kawern w solach

Modelowanie numeryczne procesu ługowania obejmuje analizę rozwoju przestrzennego kawerny oraz stężenia solanki. Ługowanie soli jest procesem złożonym, zależnym od wielu parametrów (m.in. od rozpuszczalności soli czy temperatury). Rozwinięcie uproszczonych modeli matematyczno-fizycznych przyczyniło się do stworzenia różnych programów komputerowych przeznaczonych procesowi ługowania – SANSMIC, WinUbro, SALGAS, SSCLS, SIMPLE (np. Kunstman, Urbańczyk, 1984, 1990; Saberian, 1984; Liu i in., 2017; Li i in., 2018–2020; Asagari i in., 2020). Rozwój kawerny modeluje się przez wyznaczenie reżimu ługowania, w którym określa się wzajemne relacje położenia rur doprowadzających wodę i rur odprowadzających solankę, ciśnienie tłoczenia wody oraz poziomu płynu izolującego strop, a także ich zmian w czasie. Odpowiedni dobór parametrów pozwala osiągnąć zamierzony kształt kawerny w możliwie najkrótszym czasie (rys. 91).

Do czynników niekorzystnych w procesie ługowania komór zalicza się zanieczyszczenia soli kamiennej oraz obecność przeławiceń skał łatwo i słabo rozpuszczalnych. Przedmiotem wielu badań są metody ługowania soli mającej miąższe przewarstwienia skał słabo rozpuszczalnych. Najczęściej projektuje się pojedyncze kawerny o rozciągłości pionowej. Budowa poziomych kawern jest rzadkością, zwykle jest ona wymuszona przez ograniczenia geologiczne, głównie związane z małą miąższością pokładu. Trudności technologiczne w ługowaniu związane z niejednorodnością ługowanego ośrodka mogą przyczynić się do powstania nieregularnego kształtu komory w porównaniu do zaprojektowanego. Na rysunku 92 pokazano przykłady nieregularnych geometrii kawern w wysadach solnych Góra (G-6, G-10) oraz Mogilno (M-28, M-34).

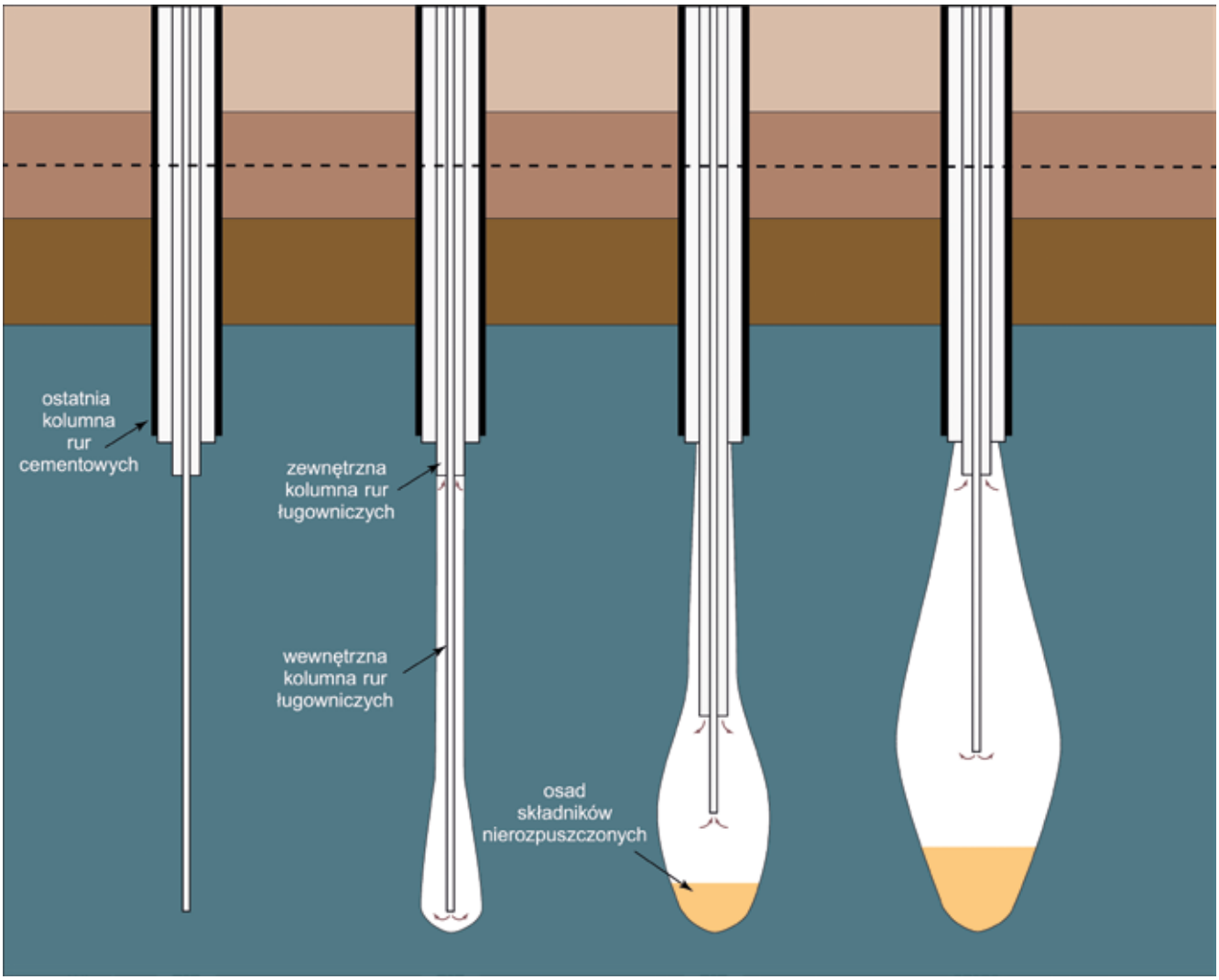
5.4.10. Prawa materiałowe dla soli

Pomimo że sól jest jednym z najbardziej eksplorowanych ośrodków skalnych, wybór prawa materiałowego dla tego ośrodka jest ciągle przedmiotem naukowej dyskusji i analizy (m.in. Russo, 1981; Bérest, Brouard, 2003; Heemann i in., 2004; Hampel i in., 2012; Pudewills, 2012; Deng i in., 2020).



Rys. 90. Ilustracja kluczowych geomechanicznych parametrów i problemów związanych z projektowaniem kawern w solach (zmienione za Lux, 2009)

Z mikroskopowego punktu widzenia, za lepkie zachowanie się soli odpowiedzialne są głównie pełzanie dyslokacyjne (ang. *dislocation creep*) (Spiers i in., 1990) oraz pełzanie dyfuzyjne (ang. *pressure-solution*) (Urai i in., 1986). Pełzanie dyslokacyjne dominuje w przypadku gruboziarnistej soli, która jest poddawana dużym przyłożonym naprężeniom dyferencjalnym w wysokich temperaturach (Urai i in., 2008). W przypadku małych ziaren soli w obecności wody oraz przy małych przyłożonych naprężeniach dyferencjalnych głównym mechanizmem jest pełzanie dyfuzyjne (Urai, Spiers, 2007). W zależności od dominującego mechanizmu, makroskopowy opis relacji między naprężeniem a tempem deformacji soli różni się od siebie. W sytuacji pełzania dyslokacyjnego relacja ta jest nieliniowa (prawo Nortona), natomiast dla pełzania dyfuzyjnego relacja jest liniowa (prawo Newtona). Odkształcenia lepkie w soli często są opisywane jako kombinacja odkształceń związanych z pełzaniem dyslokacyjnym i dyfuzyjnym. W przypadku długotrwałych obciążeń przy przekroczeniu granicznych wartości naprężeń dyferencjalnych skała ulega dylatancji, podczas której obserwuje się przyrost objętości ośrodka związany z rozwojem spękań o charakterze lokalnym. Dylatancja odpowiada za pełzanie niekontrolowane i w efekcie może prowadzić do powstania spękań. W literaturze zaproponowano różne progi dylatancji. Dla krótkotrwałych obciążeń wyznacza się kryteria wytrzymałościowe, po przekroczeniu których skała ulega spękaniu. Wytrzymałość krótkotrwała w warunkach ściskania opisana jest przez kryterium np. Coulomba-Mohra, Hoek-Browna,

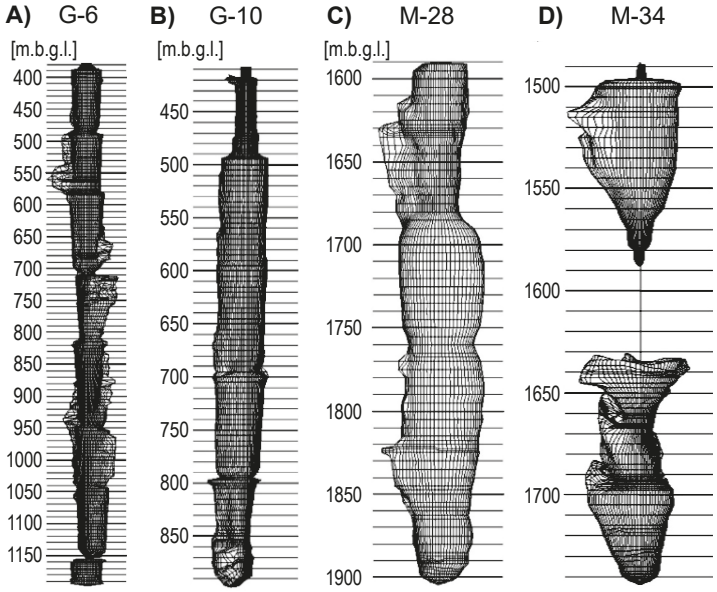


Rys. 91. Schemat ilustrujący fazy ługowania kawerny zbiornikowej (zmienione za Lux, 2009)

Drukera-Pragera, natomiast w warunkach rozciągania przez kryterium np. Griffitha. Osobnymi zagadnieniami związanymi z zachowaniem się soli podczas deformacji są m.in.:

- zmiany przepuszczalności;
- zdolność do zamykania szczelin;
- historia deformacji skały;
- wpływ temperatury na wyznaczenie kryteriów wytrzymałościowych.

W wyniku badań laboratoryjnych oraz pomiarów skał *in situ*, a także na podstawie różnych założeń teoretycznych dotyczących różnych mechanizmów deformacji, zaproponowano wiele praw materiałowych dla soli. Modele sprężysto-plastyczne są stosowane do modelowania zachowania się soli w krótkim czasie, natomiast modele lepkie i lepko-plastyczne są stosowane głównie do modelowania zachowania się soli przez długi czas. Rozwinięte zostały także bardziej złożone prawa materiałowe lepko-sprężysto-plastyczne, które próbują uchwycić zarówno krótko-, jak i długookresowe zachowanie się soli, a także włączyć różne kryteria wytrzymałościowe oraz zjawisko



Rys. 92. Kształt kawern w wysadach solnych Góra: A) G-6, B) G-10 oraz Mogilno: C) M-28, D) M-34 (Cyran, 2020)

dylatancji (Van Sambeek i in., 1993; Labaune i in., 2018). Użyteczność takich złożonych praw przy modelowaniu numerycznym jest jednak w wielu przypadkach ograniczona ze względu na skomplikowaną formułę matematyczną oraz problemy z wyznaczeniem współczynników. Listę najczęściej stosowanych w modelowaniu praw materiałowych dla soli zaprezentowano w tabeli 66 (szczegółowy opis tych praw przedstawił Khaledi, 2017).

Tabela 66

Prawa materiałowe dla soli

Typ deformacji	Prawo	Autor i/lub przykłady zastosowania	Komentarz
Lepki	Newton	Spiers i in., 1990; Ter Heege i in., 2005; Urai, Spiers, 2007	opisuje lepkie zachowanie, gdzie dominującym mechanizmem deformacji jest pełzanie dyfuzyjne (pełzanie stacjonarne)
	Norton (Norton-Hoff)	Norton, 1929; Carter, Hansen, 1983; Bérest, Brouard, 1998; Urai i in., 2008	opisuje lepkie zachowanie, gdzie dominującym mechanizmem deformacji jest pełzanie dyslokacyjne (pełzanie stacjonarne)
	Ellis	Urai i in., 2008	opisuje lepkie zachowanie, gdzie całkowite tempo odkształcenia jest sumą odkształceń związanych z pełzaniem dyfuzyjnym oraz dyslokacyjnym
	Carreau	Carreau, 1972	opisuje lepkie zachowanie łącząc w określonym wyrażeniu odkształcenia związane z pełzaniem dyfuzyjnym oraz dyslokacyjnym
	Multimechanism deformation (MD)	Munson, 1997; Munson, Dawson, 1981; Weatherby i in., 1996	opisuje pełzanie pierwotne i stacjonarne; uwzględnia trzy mechanizmy pełzania: pełzanie dyslokacyjne, pełzanie dyfuzyjne oraz wspinanie dyslokacji
	BGRa	Hunsche, 1993; Hunsche, Schulze, 1994	opisuje pełzanie stacjonarne
Lepko-sprężysty	Maxwell	Marketos i in., 2016; Cornet, Dąbrowski, 2018	jest modelem lepko-sprężystym, gdzie odkształcenie całkowite jest sumą odkształcenia sprężystego i lepkiego; model używany do opisu relaksacji
	Kelvin (Voigt)	model zwykle stanowi część bardziej złożonego prawa materiałowego	jest modelem lepko-sprężystym, gdzie naprężenie całkowite jest sumą naprężeń związanych z odkształceniem sprężystym i lepkim
	Burgers	model zwykle używany w zmodyfikowanej wersji	jest modelem będącym połączeniem elementów modelu Maxwella i Kelvina, opisuje materiały wykazujące natychmiastowe odkształcenie sprężyste, lepkie płynięcie wraz ze sprężystością opóźnioną
	Lubby2	Heusermann i in., 2003	opisuje pełzanie pierwotne i stacjonarne, jest zmodyfikowanym modelem Burgersa
	Composite model (CM)	Weidinger i in., 1997	jest modelem lepko-sprężystym, gdzie pełzanie pierwotne i stacjonarne
Uwzględniają kryteria wytrzymałościowe i/lub dylatancję	Cristescu	Cristescu, 1993; Cristescu, Gioda, 1994; Cristescu, Hunsche, 1998	opisuje właściwości sprężyste oraz pełzanie pierwotne i stacjonarne, a także uwzględnia dylatancję oraz ściśliwość
	IfG/Gunther/Salzer	Günther, Salzer, 2007; Günther i in., 2010, 2014	jest połączeniem modelu sprężystego, modelu zmodyfikowanego modelu Burgersa oraz modelu plastycznego opisanego przez zmodyfikowane kryterium wytrzymałościowe Coulomba-Mohra
	IfG/Minkley	Minkley, Mühlbauer, 2007	jest połączeniem modelu sprężystego, modelu zmodyfikowanego modelu Burgersa oraz modelu plastycznego opisanego przez zmodyfikowane kryterium wytrzymałościowe Coulomba-Mohra
	Hou-Lux	Hou, 2003; Hou i in., 2012	jest rozszerzoną wersją modelu Lubby2, gdzie uwzględnia dodatkowo rozwój dylatancji oraz efekt zamykania spękań
	Composite Dilatancy Model (CDM)	Hampel, Schulze, 2007; Hampel, 2012	opisuje pełzanie pierwotne i stacjonarne, rozwój dylatancji oraz spękań, a także zachowanie się soli po spękaniu; stanowi rozszerzoną wersję modelu CM
	Multi-mechanism Deformation Coupled Fracture (MDCF)	Fossum, Fredrich, 2002	uwzględnia mechanizmy deformacji, dyslokacji i mikrospękań; stanowi rozszerzoną wersję modelu CM

6. WARUNKI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

Dokumentacja geologiczno-inżynierska na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów, w tym dwutlenku węgla, powinna określać:

– przydatność badanego terenu[55] do realizacji zamierzonego przedsięwzięcia, czyli budowy obiektu podziemnego wraz z infrastrukturą i obiektami służącymi do jego eksploatacji (obiekty naziemne);
– ocenę możliwości wykonania projektowanego obiektu podziemnego z charakterystyką zagrożeń na etapie jego budowy, eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii;
– budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne podłoża budowlanego obiektów naziemnych oraz określonej przestrzeni obiektu podziemnego.

W celu ustalenia przydatności badanego terenu do realizacji obiektu podziemnego w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej ocenia się geologiczne czynniki lokalizacji i kryteria lokalizacji, gdyż to one decydują o wyborze lokalizacji obiektu podziemnego.

Podane w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej kryteria lokalizacji stanowią podstawę do oceny możliwości wykonania projektowanego obiektu podziemnego. Ocena ta polega na sprawdzeniu, które kryteria zostały spełnione, a które nie, opierając się na opisanych w dokumentacji geologicznych i technicznych czynnikach lokalizacji.

Dobrze opisane czynniki i właściwie dobrane kryteria geologiczne mają ogromny wpływ na wybór odpowiedniej struktury, w której zostanie zapewniona optymalna lokalizacja obiektu podziemnego.

Poza czynnikami i kryteriami geologicznymi w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej opisuje się wybrane czynniki techniczne.

Ocena przydatności dla lokalizacji obiektu podziemnego obejmuje przede wszystkim środowisko geologiczno-inżynierskie, które jako część środowiska geologicznego, zmienia się pod wpływem konstrukcji i eksploatacji obiektu podziemnego/obiektów naziemnych, i jednocześnie wpływa na obiekt podziemny/obiekty naziemne. Dlatego przestrzeń podziemna, która będzie podlegać najpierw badaniom geologiczno-inżynierskim, a następnie ocenie przydatności obejmuje dwie strefy (Majer i in., 2018 zmienione):

– strefę stwierdzonego lub przewidywanego wpływu obiektu podziemnego i obiektów naziemnych na środowisko geologiczne – strefa oddziaływań inżynierskich;
– strefę stwierdzonego lub przewidywanego wpływu środowiska geologicznego na obiekt podziemny i obiekty naziemne – strefa oddziaływań geologicznych.

Wyznaczenie pierwszej strefy oddziaływań wymaga znajomości rodzaju i sposobu posadowienia obiektów naziemnych, rodzaju i sposobu budowy obiektu podziemnego oraz zasięgu strefy zmian w środowisku geologicznym powstających na skutek budowy i eksploatacji obiektu podziemnego/obiektów naziemnych. Zasięg strefy oddziaływań inżynierskich zależy od głębokości, do której jest prowadzona działalność człowieka. Strefa ta w przypadku podziemnego magazynowania i składowania mieści się w granicach od powierzchni (część naziemna) do ponad 2500 m p.p.t. (część podziemna). Obiekty podziemne i naziemne mogą być budowane w tym samym miejscu, ale na różnych głębokościach, co może prowadzić do nakładania się stref oddziaływań inżynierskich od wielu obiektów.

Druga strefa oddziaływań wymaga rozpoznania środowiska geologicznego na większych obszarach, tak żeby stwierdzić, czy mogące zachodzić w sąsiedztwie obiektu podziemnego procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne będą miały wpływ na obiekt podziemny/obiekty naziemne.

Strefy oddziaływań, geologiczna i inżynierska, mogą się pokrywać, jednak często, zwłaszcza w warunkach skomplikowanej budowy geologicznej, wzajemne położenie tych stref będzie różne.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska, poza przydatnością i oceną wykonania, określa również budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne, które opisuje się oddzielnie dla:

– podłoża budowlanego projektowanych obiektów budowlanych, czyli części naziemnej;
– określonej przestrzeni podziemnej przeznaczonej do zagospodarowania na obiekt podziemny, czyli części podziemnej w podziale na:
  - warstwę zbiornikową (kolektor),
  - warstwę uszczelniającą (izolacyjną)/warstwy uszczelniające (izolacyjne),
  - otaczający górotwór.

Jednak podstawowym celem dokumentacji geologiczno-inżynierskiej jest ustalenie warunków geologiczno-inżynierskich.

[55] Definicję *terenu badań* podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

Opisując budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne, należy wziąć pod uwagę katalog czynników podanych w tabelach 67–70. Katalog czynników wykorzystuje się do sporządzenia oceny przydatności lokalizacji oraz oceny warunków geologiczno-inżynierskich. Nie jest on zamknięty i należy go uzupełniać w zależności od cech lokalizacji obiektu podziemnego oraz od rodzaju substancji przeznaczonej do podziemnego magazynowania lub odpadu wymagającego podziemnego składowania. Katalog czynników sporządza się dla każdej lokalizacji indywidualnie na podstawie:

– materiałów archiwalnych, w tym danych z wcześniej prowadzonej eksploatacji (w przypadku obiektów adaptowanych);
– wyników badań wykonanych na wcześniejszych etapach badań, tj.:
  • przegląd lokalizacji,
  • wybór lokalizacji,
  • charakterystyka lokalizacji;
– prac i badań wykonanych na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej;
– odpowiednio przetworzonych, modelowanych i zinterpretowanych wyników wszystkich prac i badań.

Czynniki geologiczne (patrz: cz. I, rozdz. 4.1) konieczne do opisania w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz zakres badań i metody służące do ich charakterystyki powinien określić zespół dokumentatorów sporządzających dokumentację geologiczno-inżynierską.

W tabelach 67–70 zestawiono czynniki geologiczne, które w zależności od rodzaju obiektu podziemnego zaleca się opisać w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i uwzględnić w ocenie warunków geologiczno-inżynierskich. W tabelach tych nie wskazano metod określania czynników geologicznych z uwagi na złożoność zagadnień i konieczność niestandardowego podejścia do ustalania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania. Katalog metod badań przydatnych do opisu czynników geologicznych podano w części II w rozdziale 3.

6.1. CHARAKTERYSTYKA BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Opis budowy geologicznej zawiera charakterystykę cech struktury przeznaczonej na obiekt podziemny oraz otaczającego górotworu, w tym m.in. sposób ułożenia i następstwo występowania skał i gruntów, ich litologiczno-petrograficzny charakter, wiek, genezę, a także szczelność geologiczną struktury oraz czynniki geodynamiczne, w tym tektonikę i aktywność sejsmiczną.

Podczas dokonywania interpretacji i analiz niezbędne jest uwzględnienie wszystkich cech związanych z ustaleniem budowy geologicznej, w tym warunków strukturalnych, tektonicznych i geodynamicznych. Należą do nich wydzielenia genetyczne, stratygraficzne, litologiczne i tektoniczne. Interpretacje i analizy układu warstw należy przeprowadzić z odpowiednią dokładnością w zakresie zasięgu przestrzennego przewidywanego wpływu wybranej inwestycji na ośrodek geologiczny i mającego wpływ na ocenę bezpieczeństwa i stateczności obiektów znajdujących się na powierzchni oraz obiekt podziemny. Odpowiednie rozpoznanie budowy geologicznej w rezultacie pozwala na opracowanie przekrojów, map i przestrzennych modeli geologicznych (strukturalnych, parametrycznych).

W zależności od rodzaju obiektu podziemnego oraz od dostępności danych dotyczących budowy geologicznej, w tym uwarunkowań strukturalnych i geodynamicznych, w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zaleca się podawać informacje, które wskazano w tabeli 67.

Charakterystykę budowy geologicznej przygotowuje się na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych (patrz: cz. II, rozdz. 2.1) oraz wykonanych badań geologicznych, w tym geologiczno-inżynierskich (patrz: cz. II, rozdz. 3).

6.2. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

Warunki hydrogeologiczne obejmują opis cech charakteryzujących wody podziemne i środowisko ich występowania (Bażyński, Turek, 1969).

W przypadku projektowania obiektów podziemnych, analiza i interpretacja warunków hydrogeologicznych powinna być przeprowadzona dla każdego poziomu wód podziemnych w obrębie przestrzeni podziemnej, a szczególnie tych, które mogą znacząco wpływać na obiekt podziemny oraz infrastrukturę podziemną i naziemną. Podczas przeprowadzania analizy i interpretacji należy wziąć pod uwagę położenie warstw gruntów/skał przepuszczalnych i słaboprzepuszczalnych, ciśnienia poszczególnych poziomów wód podziemnych, a w przypadku skał – położenie uskoków oraz badania oceny masywu skalnego, przede wszystkim porowatości i szczelinowatości. Podstawą powinny być wyniki obserwacji i pomiarów w studniach, otworach badawczych i otworach hydrogeologicznych. Niezbędna jest przy tym analiza danych archiwalnych, zwłaszcza w zakresie historycznych obserwacji zwierciadeł i amplitudy wahań poszczególnych poziomów wód podziemnych, co pozwoli określić nie tylko ich maksymalny i minimalny stan, lecz także czy są ze sobą połączone hydraulicznie.

Niezbędne jest przeprowadzenie badań fizykochemicznych wód podziemnych, przede wszystkim w celu sprawdzenia ich możliwego wpływu na instalacje infrastruktury obsługującej inwestycję (np. agresywność w stosunku do betonu), ale też w celu określenia możliwego współoddziaływania z magazynowanymi substancjami lub składowanymi odpadami. Wiedza o składzie fizykochemicznym wód podziemnych jest także istotna z punktu widzenia potrzeb zidentyfikowania rzeczywistych, jak i potencjalnych stref występowania zanieczyszczeń i tła geochemicznego jeszcze przed rozpoczęciem inwestycji. Umożliwi to porównanie składu wód podziemnych na późniejszych etapach realizacji i pozwoli na określenie ewentualnego wpływu inwestycji na jakość wód podziemnych oraz potencjalne rozszczelnienia struktury geologicznej przeznaczonej do magazynowania lub składowania.

Tabela 67

Zestawienie wybranych czynników geologicznych istotnych do charakterystyki budowy geologicznej na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej

<table>
<tr><th rowspan="3">Warunki: geologiczno-strukturalne, geodynamiczne, geologiczno-złożowe</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w warstwach porowatych</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach solnych</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach skalnych i wyrobiskach kopalń</th></tr>
<tr><th rowspan="2">warstwy zbiornikowe (kolektor)</th><th rowspan="2">warstwy uszczelniające (izolacyjne)</th><th colspan="2">warstwy skał solnych, w których</th><th colspan="2">warstwy skał, w których</th></tr>
<tr><th>będą zlokalizowane komory</th><th>są zlokalizowane komory po ługowaniu</th><th>będą zlokalizowane komory</th><th>są zlokalizowane wyrobiska kopalni</th></tr>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr>
<tr><td rowspan="9">Rodzaj, forma, wielkość i rozciągłość struktury</td><td colspan="6">określić rodzaj struktury (patrz: cz. I, rozdz. 2)</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać warstwy skał budujące strukturę, w tym:</td></tr>
<tr><td>zdefiniować kompleks skał zbiornikowych (kolektor) przeznaczonych na magazyn/ składowisko</td><td>zdefiniować kompleks skał izolujących (uszczelnienie)</td><td>zdefiniować kompleks skał solnych przeznaczonych na magazyn/ składowisko</td><td>zdefiniować kompleks skał solnych, w których są zlokalizowane komory</td><td>zdefiniować kompleks skał przeznaczonych na magazyn/ składowisko</td><td>zdefiniować kompleks skał, w których są zlokalizowane wyrobiska kopalni</td></tr>
<tr><td>określić, czy kolektor jest jednopoziomowy czy wielopoziomowy, tj. występują w nim przewarstwienia skał znacząco zmniejszających przepływ płynów</td><td>n.d.</td><td colspan="4" rowspan="2">n.d.</td></tr>
<tr><td>n.d.</td><td>określić, czy warstwy uszczelnienia występują w jednym poziomie czy istnieje uszczelnienie zapasowe (backup caprock/seal)</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać formę struktury w tym geometrię, kształt, powierzchnię, wysokość, amplitudę, rozciągłość w planie oraz w przestrzeni 3D, wielkość</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać sposób wykształcenia i układ przestrzenny warstw w obrębie struktury</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać sposób wykształcenia i układ przestrzenny warstw otaczających strukturę</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Szczelność geologiczna struktury</td><td colspan="6">opisać, czy struktura jest szczelnie zamknięte (odizolowana od warstw skał otaczających), czy jest częściowo otwarta</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać sposób uszczelnienia struktury, np: strefa uskokowa (zamknięcie strukturalne), występowanie warstw skał ilastych i in.</td><td colspan="4">opisać, czy komory/wyrobiska są szczelne i stanowią nieprzepuszczalną barierę dla wód podziemnych</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać, czy szczelność może być zagrożona i mogą występować zmiany w szczelności wywołane np. niejednorodnością w budowie geologicznej, osiadaniem nadkładu, zmianami ciśnienia w strukturze</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać, jakie czynniki mogą wpłynąć na zagrożenie szczelności, np. konwergencja, zbyt duże maksymalne ciśnienie robocze przekraczające ciśnienie szczelinowania, oddziaływania chemiczne i termiczne</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać szczelność struktury w stropie</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">opisać szczelność struktury w stropie, opisać, czy jest zapewniona szczelność pionowa (istnieje nieprzepuszczalny nadkład)</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać szczelność struktury w spągu</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">opisać szczelność struktury w spągu</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać szczelność struktury po bokach</td><td colspan="2">n.d.</td><td>n.d.</td><td>określić, czy jest zapewniona szczelność pozioma pomiędzy kopalniami</td></tr>
<tr><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">określić, czy może dochodzić do samouszczelnienia komór z uwagi na właściwości reologiczne soli</td><td colspan="2">n.d. (poza wyrobiskami w soli)</td></tr>
<tr><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">opisać wpływ przebiegu procesów geomechanicznych, geochemicznych i termicznych na szczelność</td></tr>
<tr><td colspan="2">w przypadku składowania CO_2 przeanalizować czterostopniowy mechanizm izolowania CO_2 (izolacja strukturalna, izolacja resztkowego CO_2, izolacja roztworowa, izolacja mineralna)</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">n.d.</td></tr>
</table>

Tabela 67 cd.

1	2	3	4	5	6	7
Warstwy skał i ich układ	określić głębokość występowania stropu/spągu warstw określić, czy głębokość występowania warstw jest odpowiednia					
	określić miąższość warstw określić, czy miąższość warstw jest wystarczająco duża do wybudowania podziemnego obiektu opisać oboczne zmiany w miąższości warstw					
	opisać rodzaj, litologię, petrografię, mineralogię, wiek, genezę budujące warstwy skał i ich oboczne zmiany					
	opisać, czy warstwy skał są jednorodne litologicznie					
	opisać zawartość minerałów reagujących z magazynowaną substancją/składowanym odpadem					
	określić zawartość minerałów ilastych, które powodują zmniejszenie przepuszczalności i porowatości	określić zawartość minerałów ilastych, które powodują wzrost podatności na pełzanie	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	określić, czy w warstwach skał występują odmienne litologiczne skały, których obecność może negatywnie wpłynąć na magazynowanie/składowanie					
	np. skały pęczniejące, skały ilaste występujące obocznie lub na różnych poziomach	np. skały ulegające rozpuszczaniu	np. zanieczyszczenie soli nierozpuszczalnym materiałem skalnym (anhydryt, minerały ilaste), obecność warstw skał nierozpuszczalnych lub minerałów i skał łatwiej rozpuszczalnych od soli kamiennej), co wpływa na kształt komory		np. skały bardziej twarde lub bardziej miękkie, łatwiej lub trudniej urabialne, przewarstwienia skał zawodnionych	
	jeśli występują skały odmienne litologicznie, opisać rodzaj skał odmiennych litologicznie oraz ich miąższość, przeloty występowania, przestrzenne rozmieszczenie, kierunek zmienności, lateralną ciągłość oraz w jaki sposób wpływają na formowanie/drążenie obiektu oraz na magazynowanie/składowanie, w tym na szczelność, przepuszczalność, wytrzymałość					
	opisać charakterystyczne cechy strukturalne i rodzaj deformacji tektonicznych, jeśli występują w warstwach np. sfałdowania, upad, przewarstwienia, foliacja, uskoki, cios					
	określić, czy warstwy skał są ciągłe w poziomie i pionie					
	opisać kierunki i zagęszczenie spękań, szczelin, mikroszczelin i ich systemów w górotworze, ich drożności oraz stopień spękania górotworu					
	opisać przebieg i szczelność struktur tektonicznych, m.in. stref uskokowych, dyslokacji, dużych uskoków rozrywających, uskoków o małych zrzutach, systemów seryjnych spękań (cios), siatek otwartych spękań które powodują rozszczelnienie lub utrudnienie/polepszenie/anizotropie przepływów					
	opisać jaki jest wpływ struktur tektonicznych na warstwy i funkcjonowanie obiektu (czy może wystąpić rozszczelnienie, połączenie hydrauliczne spękań, utrudnienie/polepszenie/anizotropia przepływów, osłabienie skał i in.)					
Aktywność tektoniczna	określić, czy w obrębie struktury lub w jej sąsiedztwie występują aktywne strefy uskokowe					
	określić, czy mogą wystąpić zjawiska szczelinowania					
	określić kierunki, reżymy i wielkość naturalnych naprężeń					
	określić, czy istnieje anizotropia naprężeń poziomych związanych z oddziaływaniem sił tektonicznych					
	określić możliwość wystąpienia niestabilności tektonicznej głębiej niż planowany obiekt					
	określić, czy wykonanie obiektu może spowodować niestabilność górotworu powyżej obiektu					
	n.d.		określić prędkość przemieszczania się wysadu solnego i w związku z tym powstawania lub uaktywniania się stref uskokowych oraz stref deformacji ciągłych			
Aktywność sejsmiczna	określić, czy mogą wystąpić zjawiska sejsmiczne naturalne lub indukowane					
	określić, czy istnieje możliwość wystąpienia lokalnych kumulacji naprężeń na skutek wzmożonych odkształceń w sąsiedztwie dużych stref uskokowych					

n.d. – nie dotyczy

W zależności od rodzaju obiektu podziemnego oraz od dostępności danych dotyczących warunków hydrogeologicznych i geochemicznych, w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zaleca się podawać informacje, które wskazano w tabeli 68.

Charakterystykę warunków hydrogeologicznych opracowuje się na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych (patrz: cz. II, rozdz. 2.1) oraz wykonanych badań geologicznych, w tym geologiczno-inżynierskich (patrz: cz. II, rozdz. 3).

6.3. CHARAKTERYSTYKA I OCENA WARUNKÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Warunki geologiczno-inżynierskie są podstawą poprawnej oceny wyboru lokalizacji obiektu podziemnego oraz ustalenia jego bezpiecznej eksploatacji. Wybór lokalizacji oraz ocena warunków geologiczno-inżynierskich, poza budową geologiczną i warunkami hydrogeologicznymi, powinna uwzględniać warunki geomorfologiczne[56] (zwłaszcza w przypadku części naziemnej oraz obiektów podziemnych udostępnianych ze zbocza stoku), a także zachodzące procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne. Warunki geologiczno-inżynierskie należy oceniać oddzielnie dla części podziemnej i naziemnej.

W przypadku części naziemnej, warunki geologiczno-inżynierskie opisują cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na posadowienie obiektów budowlanych na powierzchni. Podczas ustalania warunków geologiczno-inżynierskich należy wziąć pod uwagę geomorfologię, budowę geologiczną, w tym tektonikę, sposób i charakter wykształcenia gruntów i skał, ich cechy fizyczno-mechaniczne, występowanie i charakter wód podziemnych oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne (Jakubicz, Łozińska, 1988 zmienione, Baynes, Parry, 2022).

W przypadku części podziemnej, warunki geologiczno-inżynierskie opisują cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na zagospodarowanie przestrzeni podziemnej (strefy górotworu) przeznaczonej na obiekt podziemny. Podczas ustalania warunków geologiczno-inżynierskich dla części podziemnej należy uwzględnić budowę geologiczną, w tym czynniki strukturalne i geodynamiczne, warunki hydrogeologiczne, procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne występujące lub mogące wystąpić w górotworze.

Ocena warunków geologiczno-inżynierskich dla części naziemnej może być przeprowadzona metodą punktową zgodnie z propozycją opisaną przez Kowalskiego (1988), Majer i in. (2018), w Wytycznych... (2019) oraz Majer i Sokołowską (2021).

Ocena warunków geologiczno-inżynierskich dla części podziemnej może być przeprowadzona metodą punktową podobnie jak dla części naziemnej lub metodą indywidualnie dobraną w zależności od specyfiki obiektu podziemnego. Przy czym należy podkreślić, że metoda punktowa jest bardziej obiektywna oraz umożliwia porównywanie ocen wykonanych dla różnych lokalizacji. Na potrzeby oceny warunków geologiczno-inżynierskich części podziemnej zaleca się wykorzystać metody modelowania numerycznego opisane w części II w rozdziale 5, ponieważ część czynników geologicznych może być określona pośrednio, tylko na podstawie modelowania numerycznego. Co ważne, oceniając warunki geologiczno-inżynierskie, należy wykorzystać wszystkie zebrane dane dotyczące górotworu i jego otoczenia, zwłaszcza w zakresie anizotropii wykształcenia warstw skał i gruntów.

Ocena warunków geologiczno-inżynierskich jest podstawą do przedstawienia syntezy danych i analiz wynikających z rozpoznania struktury przeznaczonej na obiekt podziemny, otaczającego górotworu oraz podłoża budowlanego obiektów naziemnych. Prawidłowo dokonana ocena warunków geologiczno-inżynierskich bezpośrednio wpływa na różne etapy procesu inwestycyjnego, w tym na bezpieczne zaprojektowanie, wykonanie i eksploatację obiektu podziemnego, infrastruktury oraz obiektów naziemnych. Powinien ją więc przeprowadzać zespół osób posiadających odpowiednie kwalifikacje geologiczne, doświadczenie i wiedzę. Istotnym jest również korzystanie z doświadczeń zespołów dokumentatorów i ekspertów oraz doświadczenia porównywalnego (Wysokiński i in., 2011). Pozwala to na uniknięcie ewentualnych awarii mogących wystąpić w trakcie budowy i eksploatacji obiektu podziemnego.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa inwestycji istotne jest zidentyfikowanie, opisanie i rozpoznanie wszelkich możliwych zjawisk i procesów geologicznych (w tym geodynamicznych i geologiczno-inżynierskich) oraz antropogenicznych. Ich analiza i interpretacja powinna być przeprowadzona w stopniu umożliwiającym określenie ich położenia i rozprzestrzenienia oraz pozwalającym na prognozowanie ich rozwoju. Niezbędne jest przede wszystkim zwrócenie uwagi na te zjawiska i procesy, które mogą zagrażać zarówno naziemnym obiektom budowlanym, infrastrukturze podziemnej, jak i obiektowi podziemnemu.

W celu charakterystyki warunków geologiczno-inżynierskich, w zależności od rodzaju obiektu podziemnego oraz od dostępności danych, w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zaleca się podawać informacje, które wskazano w tabeli 69. Ocena warunków geologiczno-inżynierskich powinna natomiast uwzględniać wszystkie dane zebrane podczas procesu dokumentowania (tab. 67–70).

Charakterystykę i ocenę warunków geologiczno-inżynierskich sporządza się na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych (patrz: cz. II, rozdz. 2.1) oraz wyników wykonanych i zinterpretowanych badań geologicznych, w tym geologiczno-inżynierskich (patrz: cz. II, rozdz. 3).

[56] Ważniejsze definicje podano na końcu poradnika w rozdz. „Terminologia".

Tabela 68

Zestawienie wybranych czynników geologicznych istotnych do charakterystyki warunków hydrogeologicznych na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej

<table>
<tr><td rowspan="3">Warunki hydrogeologiczne</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w warstwach porowatych</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach solnych</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach skalnych i wyrobiskach kopalń</td></tr>
<tr><td rowspan="2">warstwy zbiornikowe (kolektor)</td><td rowspan="2">warstwy uszczelniające (izolacyjne)</td><td colspan="2">warstwy skał solnych, w których</td><td colspan="2">warstwy skał, w których</td></tr>
<tr><td>będą zlokalizowane komory</td><td>są zlokalizowane komory po ługowaniu</td><td>będą zlokalizowane komory</td><td>są zlokalizowane wyrobiska kopalni</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr>
<tr><td rowspan="13">Zawodnienie górotworu</td><td colspan="6">określić liczbę poziomów wodonośnych w górotworze, głębokość ich występowania, miąższość oraz uziarnienie</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać poziomy zwierciadeł nawierconych i ustabilizowanych (piezometrycznych) dla wszystkich stwierdzonych poziomów wodonośnych</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać, czy ciśnienia mają charakter artezyjski, czy subartezyjski</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać sposób zasilania górotworu w wodę, np.: zasilanie warstw na wychodniach, zasilanie pośrednie przez szczeliny, pory, warstwy uszczelnienia, brak zasilania poprzez całkowite odcięcie warstw wypełnionych wodą podziemną</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić, które poziomy wodonośne będą miały wpływ na pracę podziemnego obiektu</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić negatywny i pozytywny wpływ zawodnienia górotworu na podziemny obiekt</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić stopień nasycenia/zawodnienia górotworu</td><td colspan="4">określić stopień nasycenia/zawodnienia górotworu wokół komór/wyrobisk</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić, czy obiekt jest położony w całości w strefie nasyconej wodą (optymalne warunki dla lokalizacji magazynów)</td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="2">n.d.</td><td colspan="2">określić, czy w stropie kompleksu skał występuje warstwa wodonośna o dużej przepuszczalności i wysokim ciśnieniu piezometrycznym</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy w spągu kompleksu skał występuje warstwa wodonośna o dużej przepuszczalności i wysokim ciśnieniu piezometrycznym</td></tr>
<tr><td>określić skład chemiczny wód podziemnych w kolektorze</td><td colspan="5" rowspan="2">n.d.</td></tr>
<tr><td>określić ściśliwość wód podziemnych (macierzystych płynów złożowych) w efekcie zwiększenia ciśnienie piezometrycznego oraz stosowanego ciśnienia wtłaczania płynów</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Warunki hydrodynamiczne</td><td colspan="6">opisać system krążenia wód podziemnych, możliwe połączenia poszczególnych poziomów wód podziemnych oraz wszystkie możliwe drogi filtracji</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić możliwe kierunki przepływu wód podziemnych</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać wpływ obiektu na zmianę warunków przepływu wód podziemnych</td></tr>
<tr><td>opisać możliwe dopływy wód do kolektora</td><td>n.d.</td><td colspan="4">opisać możliwe dopływy wód podziemnych do komór/wyrobisk</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Oddziaływania geochemiczne</td><td colspan="6">określić skład chemiczny wód podziemnych znajdujących się w warstwach, które mogą oddziaływać na podziemny obiekt</td></tr>
<tr><td>określić zasolenia wód podziemnych (szczelność)</td><td>określić zasolenie wód porowych (szczelność)</td><td colspan="4">n.d.</td></tr>
<tr><td colspan="2">sprawdzić wpływ temperatury i ciśnienia na zachodzące zmiany chemiczne</td><td colspan="4">opisać możliwość zachodzenia zmian chemicznych pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia, obecności tlenu lub wody w komorach/wyrobiskach sprzyjające procesom wietrzenia</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać możliwość mieszania się i zachodzenia reakcji chemicznych miedzy wodami podziemnymi, płynami złożowymi, zatłaczanymi płynami i skałami</td><td colspan="4">opisać możliwość mieszania się i zachodzenia reakcji chemicznych miedzy wodami podziemnymi, gromadzonymi substancjami/odpadami a skałami (np. pęcznienie, nasiąkanie, rozpuszczanie)</td></tr>
</table>

Tabela 68 cd.

1	2	3	4	5	6	7
cd. Oddziaływania geochemiczne	określić, czy w efekcie naruszenia równowagi geochemicznej może dochodzić do tworzenia się związków koloidalnych, wytrącania osadów chemicznych (zwłaszcza tlenki i wodorotlenki metali) i minerałów, co prowadzi do kolmatacji	n.d.				
	określić, czy istnieje możliwość zachodzenia kolmatacji, opisać szybkość zachodzenia kolmatacji w zależności od wykształcenia litologicznego, jeśli możliwe, to określić stopień kolmatacji					
	określić, czy istnieje możliwość wystąpienia korozji stalowych rur odwiertów (np. z uwagi na występowanie rozpuszczanych gazów typu tlen, dwutlenek węgla, siarkowodór) i tworzenia się osadów w wyniku korozji					
	określić, czy w efekcie naruszenia równowagi geochemicznej może dochodzić do rozpuszczania poszczególnych minerałów		n.d.			
	określić, czy istnieje możliwość wytrącania się koloidów pochodzenia biochemicznego oraz występowania bakterii mogących negatywnie oddziaływać na pracę obiektu	n.d.				
	określić, czy w porach/szczelinach występują tylko wody podziemne, czy inne płyny utrudniające przepływ, co wymaga zwiększonego ciśnienia, aby magazynowane substancje/składowane odpady mogły się przemieszczać					

Tabela 69

Zestawienie wybranych czynników geologicznych istotnych do charakterystyki warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej

<table>
<tr><th rowspan="3">Warunki geomechaniczne, warunki geotermalne, warunki geologiczno-inżynierskie</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w warstwach porowatych</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach solnych</th><th colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach skalnych i wyrobiskach kopalń</th></tr>
<tr><th rowspan="2">warstwy zbiornikowe (kolektor)</th><th rowspan="2">warstwy uszczelniające (izolacyjne)</th><th colspan="2">warstwy skał solnych, w których</th><th colspan="2">warstwy skał, w których</th></tr>
<tr><th>będą zlokalizowane komory</th><th>są zlokalizowane komory po ługowaniu</th><th>będą zlokalizowane komory</th><th>są zlokalizowane wyrobiska kopalni</th></tr>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr>
<tr><td rowspan="15">Właściwości petrofizyczne</td><td colspan="6">opisać i zbadać podstawowe cechy petrofizyczne skał, przede wszystkim:</td></tr>
<tr><td colspan="2">porowatość efektywna</td><td colspan="2" rowspan="3">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">porowatość efektywna</td></tr>
<tr><td colspan="2">szczelinowatość</td><td colspan="2">szczelinowatość</td></tr>
<tr><td colspan="2">kawernistość</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td colspan="6">przepuszczalność</td></tr>
<tr><td colspan="2">współczynnik filtracji</td><td colspan="2" rowspan="3">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">rozmakalność</td></tr>
<tr><td colspan="2">drożność szczelin</td></tr>
<tr><td colspan="2">gęstość</td><td colspan="2" rowspan="3">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td colspan="2">skład chemicznych</td></tr>
<tr><td colspan="2">wilgotność</td></tr>
<tr><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">określić podatność skał na ługowanie</td><td colspan="2">n.d.</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać zmienność parametrów fizycznych skał</td></tr>
<tr><td>określić pojemność porów/szczelin, które mogą być efektywnie zajęte przez magazynowaną substancję/składowany odpad</td><td>n.d.</td><td colspan="4" rowspan="2">n.d.</td></tr>
<tr><td>n.d.</td><td>określić anizotropię przepuszczalności w kierunku pionowym i poziomym</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Właściwości mechaniczne skał</td><td colspan="6">opisać i zbadać podstawowe parametry mechaniczne skał, przede wszystkim:</td></tr>
<tr><td>właściwości sprężyste (moduły sprężystości)</td><td colspan="3">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">właściwości sprężyste (moduł sprężystości)</td></tr>
<tr><td colspan="6">wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie</td></tr>
<tr><td colspan="6">wytrzymałość w warunkach trójosiowego ściskania (izotropowo, anizotropowo)</td></tr>
<tr><td colspan="2">wytrzymałość na rozciąganie</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">wytrzymałość na rozciąganie</td></tr>
<tr><td colspan="4">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">wytrzymałość w warunkach oddziaływań cyklicznych</td></tr>
<tr><td>współczynniki tarcia na powierzchniach spękań, kontrolujących zachowanie skał w warunkach podwyższonego ciśnienia</td><td colspan="5">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td>jeśli jest taka potrzeba</td><td>anizotropię wszelkich parametrów mechanicznych w kierunku pionowym i poziomym</td><td colspan="4">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td>ściśliwość w różnych warunkach naprężenia</td><td>jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">ściśliwość w różnych warunkach naprężenia</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
</table>

Tabela 69 cd.

<table>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr>
<tr><td rowspan="5">cd.
Właściwości mechaniczne skał</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="4">parametry odkształceniowe w zależności od faz odkształcenia charakterystycznych dla danego rodzaju skał (m.in. modułów odkształcenia)</td></tr>
<tr><td>jeśli jest taka potrzeba</td><td>właściwości reologiczne, w tym pełzanie w przypadku kompleksów skał ilastych</td><td colspan="2">właściwości reologiczne w tym pełzanie</td><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td></tr>
<tr><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="4">charakterystykę naprężeniowo-deformacyjną masywu skalnego otaczającego komory/wyrobiska</td></tr>
<tr><td colspan="6">zmienność parametrów mechanicznych skał z uwagi na rożne czynniki w tym: anizotropie ośrodka, zmiany temperatury, ciśnienia, naprężeń</td></tr>
<tr><td colspan="2">jeśli jest taka potrzeba</td><td colspan="2">wpływ stanu naprężeń na właściwości odkształceniowe oraz reologiczne
opisać wpływ temperatury, wilgotności, składu petrograficznego, wielkości ziaren/kryształów na właściwości odkształceniowe oraz reologiczne</td><td colspan="2">wpływ wykonania wyrobisk, oddziaływania wody, temperatury, reakcji chemicznymi na właściwości mechaniczne skał</td></tr>
<tr><td>Konwergencja wyrobisk górniczych</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="4">określić tempo i wielkość konwergencji w zależności od właściwości reologicznych, ciśnienia pierwotnego, temperatury oraz różnicy naprężeń pierwotnych i ciśnień roboczych</td></tr>
<tr><td rowspan="9">Stabilność geomechaniczna</td><td colspan="2" rowspan="3">n.d.</td><td colspan="4">ocenić masyw skalny</td></tr>
<tr><td colspan="4">określić długotrwałą stateczność geomechaniczną komór/wyrobisk</td></tr>
<tr><td colspan="4">określić wielkość wytężenia górotworu w otoczeniu komory/wyrobiska</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać stan naprężeń pierwotnych (naturalnych)</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać naprężenia wtórne (eksploatacyjne) po wybudowaniu obiektu</td></tr>
<tr><td colspan="6">ocenić zmiany stanu naprężeń po wybudowaniu obiektu</td></tr>
<tr><td colspan="2">opisać wpływ zmian stanu naprężeń na zachowanie się otaczającego górotworu</td><td colspan="4">opisać wpływ zmian stanu naprężeń na zachowanie się komory/wyrobiska i otaczającego górotworu</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">n.d.</td><td colspan="4">opisać wpływ przebiegu procesów geomechanicznych, geochemicznych i termicznych na stateczność geomechaniczną komór/wyrobisk</td></tr>
<tr><td colspan="4">określić, czy może dochodzić do koncentracji naprężeń zarówno rozciągających, jak i ścinających na konturze komór/wyrobisk powodujących utratę szczelności i stateczności oraz odprężanie i odspajanie skał</td></tr>
<tr><td>Ciśnienie złożowe (piezometryczne)</td><td colspan="6">określić wysokość ciśnienia piezometrycznego oraz jego zmiany na potrzeby ustalenia warunków pracy podziemnego obiektu</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Ciśnienie górotworu</td><td colspan="6">określić gradient ciśnienia w lokalizacji obiektu z uwagi na jego zmienność</td></tr>
<tr><td>określić, czy obiekt jest położony w strefie gdzie ciśnienie hydrostatyczne wód podziemnych jest równe lub nieznacznie wyższe od ciśnienia przechowywanego płynu</td><td colspan="5" rowspan="3">n.d.</td></tr>
<tr><td>określić, czy ciśnienie umożliwia magazynowanie/składowanie substancji/odpadu</td></tr>
<tr><td>określić, czy na skutek wzrostu ciśnienia porowego może dochodzić do sejsmicznej aktywności uskoków, naturalnego szczelinowania hydraulicznego, otwierania naturalnych szczelin</td></tr>
</table>

Tabela 69 cd.

1	2	3	4	5	6	7
cd. Ciśnienie górotworu	określić ciśnienie płynów porowych i jego zmienność z uwagi na szczelność struktury	n.d.				
	określić ciśnienie kapilarne powodujące wnikanie (*capillary entry pressure*) płynu w warstwy skał					
Uwarunkowania termiczne	określić gradient termiczny w lokalizacji obiektu z uwagi na jego zmienność i wpływ na pracę obiektu					
	opisać procesy termodynamiczne jakie mogą zachodzić w trakcie magazynowania/składowania, głównie możliwości wymiany ciepła z otaczającym górotworem					
	określić, czy występuje odpowiednia temperatura umożliwiająca magazynowanie/składowanie substancji/odpadu	n.d.	określić, czy występuje odpowiednia temperatura umożliwiająca magazynowanie/składowanie substancji/odpadu			
	określić, czy może dochodzić do zmian temperatury w wyniku pracy obiektu np. reakcji chemicznych		określić, czy może dochodzić do zmian temperatury w wyniku pracy obiektu np. reakcji chemicznych			
	określić wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej skał		określić wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej skał			
	określić możliwości powstawania naprężeń termicznych w związku z gradientem temperatury i zmiennymi właściwościami termicznymi skał		określić możliwości powstawania naprężeń termicznych w związku z gradientem temperatury i zmiennymi właściwościami termicznymi skał			
	określić temperaturę wód podziemnych					
Procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne	opisać procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne (korzystne i niekorzystne) mogące mieć wpływ na budowę i funkcjonowanie obiektu podziemnego oraz obiektów naziemnych					
Geomorfologia terenu	jeśli jest taka potrzeba				zidentyfikować i opisać formy geomorfologiczne występujące na terenie lokalizacji obiektu podziemnego	
					określić spadki terenu dla części naziemnej	

6.4. CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW GEOLOGICZNO-GÓRNICZYCH

Charakterystyka warunków geologiczno-górniczych jest niezbędna do oceny możliwości wykonania obiektu podziemnego. Sporządza się ją na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych (patrz: cz. II, rozdz. 2.1), wyników badań geologicznych, w tym geologiczno-inżynierskich (patrz: cz. II, rozdz. 3), zebranych danych dotyczące budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich (patrz: cz. II, rozdz. 6.1–6.3) oraz modelowania numerycznego (patrz: cz. II, rozdz. 5).

Warunki geologiczno-górnicze nie muszą być szczegółowo opisane w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, ponieważ na etapie jej wykonywania dane mogą być niewystarczające, a część z nich może być ustalona tylko na podstawie opracowanych modeli numerycznych, zarówno statycznych, jak i dynamicznych.

W zależności od rodzaju obiektu podziemnego oraz od dostępności danych dotyczących warunków górniczych, w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej zaleca się podawać informacje, które wskazano w tabeli 70.

Tabela 70

Zestawienie wybranych czynników górniczych istotnych do charakterystyki warunków geologiczno-górniczych na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej

<table>
<tr><td rowspan="3">Warunki geologiczno-górnicze</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w warstwach porowatych</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach solnych</td><td colspan="2">Obiekty podziemne w specjalnie wykonanych komorach skalnych i wyrobiskach kopalń</td></tr>
<tr><td rowspan="2">warstwy zbiornikowe (kolektor)</td><td rowspan="2">warstwy uszczelniające (izolacyjne)</td><td colspan="2">warstwy skał solnych, w których</td><td colspan="2">warstwy skał, w których</td></tr>
<tr><td>będą zlokalizowane komory</td><td>są zlokalizowane komory po ługowaniu</td><td>będą zlokalizowane komory</td><td>są zlokalizowane wyrobiska kopalni</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Uwarunkowania ogólne</td><td colspan="6">określić rodzaj podziemnego obiektu: podziemny bezzbiornikowy magazyn substancji czy podziemne składowisko odpadów</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić rodzaj i ilość magazynowanych substancji/składowanych odpadów</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy obiekt będzie umiejscowiony w:
warstwach wyeksploatowanych złóż węglowodorów
warstwach zawodnionych (solankowych)
warstwach węgla kamiennego
warstwach skał ilastych</td><td colspan="2">określić, czy obiekt będzie umiejscowiony w:
komorach solonych specjalnie wyługowanych na obiekt
komorach solnych wyługowanych na inne cele, które będą adaptowane na obiekt</td><td colspan="2">określić, czy obiekt będzie umiejscowiony w:
komorach skalnych specjalnie wydrążonych na obiekt
wyrobiskach kopalń, które będą adaptowane na obiekt
pustkach skalnych</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy podczas magazynowania/składowania będzie jednocześnie prowadzone wydobycie węglowodorów (dotyczy obiektów w warstwach złóż węglowodorów)</td><td colspan="2">n.d.</td><td colspan="2">określić, czy podczas magazynowania/składowania będzie jednocześnie prowadzone wydobycie kopalin ze złóż (dotyczy obiektów w wyrobiskach kopalń)</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Magazynowane substancje/składowane odpady</td><td colspan="6">opisać skład chemiczny substancji/odpadów w celu ustalenia reaktywności ze skałami</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać wzajemne chemiczne oddziaływania substancji/odpadów i skał</td></tr>
<tr><td colspan="6">określić temperaturę zatłaczanych płynów i jej wpływ na zmiany chemiczne</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy w zatłaczanych płynnych substancjach/odpadach znajdują się części stałe (iły, drobiny skalne, piasek, pyły, koloidalna krzemionka i inne zanieczyszczenia mechaniczne), koloidy pochodzenia chemicznego i biochemicznego mogące się wytrącać w warstwach skał i powodować kolmatację</td><td colspan="4" rowspan="3">n.d.</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy w płynach występują kolmatogenne składniki np. azot, tlen, żelazo, mangan, siarka, które wymagają oczyszczenia</td></tr>
<tr><td colspan="2">określić, czy w zatłaczanych płynnych substancjach/odpadach znajdują się bakterie (np. bakterie żelazowe, bakterie siarkowe) mogące oddziaływać na skały lub wody podziemne</td></tr>
</table>

Tabela 70 cd.

1	2	3	4	5	6	7
cd. Magazynowane substancje/składowane odpady	określić, czy będą konieczne metody sterylizacji zatłaczanych płynów, w przypadku obecności w nich bakterii mogących ujemnie oddziaływać na skały (możliwość kolmatacji) lub na rury w odwiercie (korozja)		n.d.			
	n.d.		określić dostępność tzw. solanki manewrowej w przypadku magazynów substancji ciekłych		n.d.	
			określić sposób magazynowania solanki manewrowej w przypadku magazynów substancji ciekłych			
			n.d.		określić, czy na powierzchni istnieje możliwość budowy zbiornika kompensacyjnego w przypadku magazynów pracujących z kompensacją ciśnienia	
	określić w jakim stanie skupienia będzie przetrzymywany płyn w obiekcie podziemnym					
	opisać w jaki sposób będzie się zachowywał płyn na danej głębokości z uwagi na jego stan skupienia, który zależy od głębokości, gradientu termicznego i gradientu ciśnienia	n.d.				
	opisać możliwości i sposób przemieszczania się płynu					
	opisać możliwe przeszkody w przepływie płynów np.: przechwytywanie płynu przez drobne struktury (głównie sedymentacyjne), zatrzymywanie przez siły kapilarne na powierzchni ziaren, rozpuszczanie płynu w wodzie podziemnej, wytrącanie minerałów z wody podziemnej na dnie kolektora, procesy sorpcji na powierzchni minerałów					
Urabialność masywu skalnego	n.d.				określić urabialność skał przeznaczonych do wykonania komór	
Ługowanie komór solnych	n.d.		określić, czy istnieje możliwość zastosowania technologii ługowniczej	n.d.		
			określić negatywne czynniki, które będą miały wpływ na proces ługowania komór			
			określić podatność skał na ługowanie			

Tabela 70 cd.

1	2	3	4	5	6	7
cd. Ługowanie komór solnych	n.d.		określić, czy do ługowania będzie używana woda słodka, nienasycona solanka, nasycona solanka, ponieważ wpływa to na liczbę wypełnień komór solanką	n.d.		
Dostępność wody do ługowania	n.d.		określić źródła dostaw wody do ługowania z uwagi na lokalizację obiektu (nadmorska, w głębi lądu, powiązana z kopalnią produkującą solankę)	n.d.		
			określić ilość wody potrzebnej do ługowania			
Odpady wydobywcze	n.d.		określić, czy istnieją możliwości zrzutu solanki odpadowej	n.d.		
			określić sposób zagospodarowania solanki odpadowej	n.d.	określić sposób zagospodarowania wydobytych skał, kopalin	n.d.
Kształt, wielkość i rozstaw wyrobisk górniczych	ustalić wielkość ciśnienia szczelinowania (dotyczy tylko wyrobisk powstających w wyniku szczelinowania)		określić rozmiar, ilość i rozstaw komór w zależności od cech struktury, rodzaju obiektu i rodzaju gromadzonych substancji/odpadów	n.d.	określić rozmiar, ilość i rozstaw komór w zależności od cech struktury, rodzaju obiektu i rodzaju gromadzonych substancji/odpadów	n.d.
			opisać czynniki mające wpływ na kształt, rozmiar i rozstaw komór	n.d.	opisać czynniki mające wpływ na kształt, rozmiar i rozstaw komór	n.d.
			n.d.	określić, czy istnieją możliwości wykorzystanie komór ługowniczych na potrzeby magazynowania/składowania zwłaszcza w zależności od rodzaju i ilości substancji/odpadów	n.d.	określić, czy istnieją możliwości wykorzystanie wyrobisk górniczych na potrzeby magazynowania/składowania zwłaszcza w zależności od rodzaju i ilości substancji/odpadów
Strefowość złoża	wyznaczyć strefy bardzo dobrze przepuszczalne i mało przepuszczalne	n.d.				
	w przypadku obiektów w warstwach złóż węglowodorów wyznaczyć strefy w złożu: strefę optymalną, strefę przejściową oraz strefę drugorzędną					

Tabela 70 cd.

1	2	3	4	5	6	7
cd. Strefowość złoża	określić optymalną strefę złoża do magazynowania/ składowania, tj. strefę, gdzie występują najlepsze właściwości zbiorni-kowe i najlepszy rozkład porowato-ści/szczelinowatości i przepuszczalności	n.d.				
Chłonność	określić jaka jest chłonność kolektora	n.d.				
	określić, czy porowatość/ szczelinowatość jest na tyle wysoka, że będzie zapewniona odpowiednia chłonność					
	opisać możliwości poprawienia chłonności np. poprzez zabiegi szczelinowania					
Pojemność	opisać czynniki, które będą miały wpływ na pojemność kolektora	n.d.	opisać czynniki, które będą miały wpływ na pojemność komór/wyrobisk			
	określić pojemność warstwy kolektora		określić pojemność każdej komory/wyrobiska i całkowitą pojemność wszystkich komór/wyrobisk			
	opisać, negatywne czynniki, które będą miały wpływ na zmniejszenie pojemności		opisać, negatywne czynniki, które będą miały wpływ na zmniejszenie pojemności			
	określić, czy pojemość warstwy jest wystarczająco duża do przechowy-wania określonych ilości substancji/ odpadów		określić, czy pojemość warstwy jest wystarczająco duża do przechowywania określonych ilości substancji/odpadów			
	określić, czy istnieją możliwości poprawienia pojemności		określić, czy istnieją możliwości poprawienia pojemności			
	określić występowa-nie uszczelnień obocznych zmniejszających pojemność obiektu		n.d.			

Tabela 70 cd.

1	2	3	4	5	6	7
Ciśnienie robocze (dotyczy magazynowania płynnych substancji/składowania płynnych odpadów)	określić ciśnienie robocze w odniesieniu do rodzaju warstwy porowatej (zazwyczaj w warstwach złóż węglowodorów potrzeba wyższych ciśnień nić w warstwach zawodnionych z uwagi na częściowe zajęcie przestrzeni porowej przez węglowodory i konieczność pokonania sił napięcia powierzchniowego na granicy gaz–woda, ropa–woda)	n.d.	określić ciśnienie robocze dla każdej komory/wyrobiska			
	określić minimalne ciśnienie robocze zapewniające brak możliwości wnikania wód podziemnych do obiektu powodujące zmniejszanie jego pojemności i efektywności pracy	n.d.	określić minimalne ciśnienie robocze dla każdej komory/wyrobiska z uwagi na wytrzymałość górotworu na konturze i konwergencję			
	określić maksymalne ciśnienie robocze z uwagi na ciśnienia piezometryczne oraz ciśnienia szczelinowania	n.d.	określić maksymalne ciśnienie robocze dla każdej komory/wyrobiska z uwagi na możliwość szczelinowania górotworu oraz wielkość ciśnienia pierwotnego			
	określić zakres ciśnień w jakich może pracować obiekt	n.d.	określić zakres ciśnień roboczych, w jakich mogą pracować poszczególne komory/wyrobiska			
Szczelność techniczna	opisać elementy, które będą miały wpływ na szczelność techniczną					
	określić, czy będzie zapewniona szczelność techniczna					
	określić, czy były wykonywane próby/badania szczelności np. otworów (rur i cementacji), komór/wyrobisk, szybów					
	n.d.					określić w jakim stanie jest obudowa szybów i czy można zapewnić ich szczelność
						określić liczbę i stan wyrobisk udostepniających z powierzchni

Tabela 70 cd.

<table>
<tr><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th></tr>
<tr><td rowspan="2">cd.
Szczelność techniczna</td><td colspan="6">n.d.</td><td>określić, czy wyrobiska udostepniające z powierzchni wymagają szczelnego podsadzenia</td></tr>
<tr><td colspan="6"></td><td>określić liczbę szybów, wyrobisk i otworów z powierzchni wymagających likwidacji</td></tr>
<tr><td>Warunki pracy podziemnego obiektu</td><td colspan="2">opisać w jakich warunkach będzie pracował podziemny obiekt, np. w przypadku magazynu gazu: w warunkach reżymu gazowego (wolumetrycznego), wodno-naporowego, mieszanego</td><td colspan="4">opisać warunki pracy (eksploatacji) w zależności od rodzaju substancji/odpadu (inne dla gazu, inne dla ciekłych węglowodorów, inne dla płynnych odpadów, inne dla stałych odpadów)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Bezpieczeństwo pracy podziemnego obiektu</td><td colspan="6">określić czynniki, które będą miały wpływ na bezpieczeństwo pracy podziemnego obiektu</td></tr>
<tr><td colspan="6">opisać zakres prac, które należy wykonać, żeby zapewnić bezpieczeństwo pracy podziemnego obiektu</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">n.d.</td><td>określić grubość filarów bezpieczeństwa, filarów granicznych, półek bezpieczeństwa nad i pod komorą ze względów geomechanicznych i technologicznych, a także na szczelność i zapobieganie napływom wód podziemnych do komór</td><td>n.d.</td><td>określić grubość filarów bezpieczeństwa, filarów granicznych, półek bezpieczeństwa nad i pod komorą ze względów geomechanicznych i technologicznych, a także na szczelność i zapobieganie napływom wód podziemnych do komór/wyrobisk</td><td>n.d.</td></tr>
<tr><td>n.d.</td><td>określić, czy istniejące grubości filarów bezpieczeństwa, filarów granicznych, półek bezpieczeństwa nad i pod komorą są wystarczające z uwagi na bezpieczeństwo pracy obiektu, szczelność i zapobieganie napływom wód podziemnych do komór</td><td>n.d.</td><td>określić, czy istniejące grubości filarów bezpieczeństwa, filarów granicznych, półek bezpieczeństwa nad i pod komorą są wystarczające z uwagi na bezpieczeństwo pracy obiektu, szczelność i zapobieganie napływom wód podziemnych do komór/wyrobisk</td></tr>
<tr><td colspan="3">n.d.</td><td colspan="3">określić, czy istnieje możliwość wystąpienia zagrożeń: metanowych, wyrzutów gazów i skał, wodnych</td></tr>
</table>

7. ZAWARTOŚĆ OPRACOWAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Podstawą prawną dokumentowania geologiczno-inżynierskiego są przepisy Ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze oraz przepisy powiązane (akty wykonawcze), w szczególności:

– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga koncesji wraz z rozporządzeniem zmieniającym z dnia 1 lipca 2015;
– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej;
– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2017 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania informacji geologicznej;
– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 20 grudnia 2011 r. w sprawie korzystania z informacji geologicznej za wynagrodzeniem;
– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie sposobu i zakresu wykonywania obowiązku udostępniania i przekazywania informacji oraz próbek organom administracji geologicznej przez wykonawcę prac geologicznych.

Zgodnie z przepisami pgg w celu sporządzenia dokumentacji geologiczno-inżynierskiej konieczne jest przygotowanie i zatwierdzenie projektu robót geologicznych przez właściwy organ administracji geologicznej. Zatwierdzenie projektu robót może mieć formę **decyzji zatwierdzającej** projekt robót albo **koncesji**.

Zawartość projektu robót geologicznych określono w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji wraz z rozporządzeniem zmieniającym z dnia 1 lipca 2015.

Właściwy organ administracji geologicznej odmawia zatwierdzenia projektu robót geologicznych, jeżeli:

– projektowane roboty naruszyłyby wymagania ochrony środowiska;
– projekt robót geologicznych nie odpowiada wymaganiom prawa;
– rodzaj i zakres projektowanych robót geologicznych oraz sposób ich wykonania nie odpowiadają celowi tych robót.

Szczegóły dotyczące obowiązków związanych z prowadzenie robót geologicznych i badań geofizycznych podano w części II poradnika w poszczególnych podrozdziałach rozdziału 3.

Po zakończeniu robót geologicznych na podstawie wyników prac i robót geologicznych sporządza się dokumentację geologiczno-inżynierską. Zgodnie z artykułem 91 ust. 1 pgg dokumentację geologiczno-inżynierską sporządza się w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla. W dokumentacji określa się w szczególności: budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne podłoża budowlanego lub określonej przestrzeni, przydatność badanego terenu do realizacji zamierzonych przedsięwzięć, prognozę zmian w środowisku, które mogą powstać na skutek realizacji, funkcjonowania oraz likwidacji zamierzonych przedsięwzięć – jeżeli nie ma obowiązku sporządzenia raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko zgodnie z odrębnymi przepisami.

Zatwierdzenie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej może mieć formę **decyzji zatwierdzającej** dokumentację albo **koncesji**.

Właściwy organ administracji geologicznej zatwierdza dokumentację w drodze decyzji lub odmawia jej zatwierdzenia, jeżeli:

– nie odpowiada wymaganiom prawa;
– powstała w wyniku działań niezgodnych z prawem.

Zarówno do projektu robót, jak i do dokumentacji można sporządzić dodatek. Zawartość dodatków regulują wspomniane wyżej rozporządzenia (w sprawie projektu robót oraz w sprawie dokumentacji).

7.1. ZAWARTOŚĆ PROJEKTU ROBÓT GEOLOGICZNYCH NA POTRZEBY PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA I PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA

Projekt robót geologicznych jest dokumentem (opracowaniem geologicznym), który stanowi podstawę wykonania prac i robót geologicznych. Zawiera cel zamierzonych robót geologicznych, sposób ich osiągnięcia, rodzaj dokumentacji geologicznej, która powstanie w efekcie wykonania robót, harmonogram robót, przestrzeń objętą robotami oraz przedsięwzięcia konieczne z uwagi na ochronę środowiska (Majer i in., 2018).

Podstawę prawną opracowania projektu robót geologicznych stanowi:
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (art. 79 ust. 1, ust. 2; art. 25 ust. 2);
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 zmieniające ww. rozporządzenie (dalej: rozporządzenia PRG).

Dodatkowe wymagania w zakresie koniecznych do zaprojektowania badań zawiera opis przedmiotu zamówienia (OPZ) Inwestora/Zamawiającego.

Projekt robót geologicznych jest wymagany:
- do wniosku o udzielenie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie złoża kopaliny (art. 25 ust. 2 ustawy pgg);
- do wniosku o udzielenie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (art. 25 ust. 2 ustawy pgg);
- zawsze, gdy są planowane roboty geologiczne.

Projekt robót geologicznych podlega procedurze administracyjnej w zakresie wydania decyzji zatwierdzającej lub udzielenia koncesji. Projekt robót geologicznych załącza się do wniosku o udzielenie koncesji lub składa się wniosek o jego zatwierdzenie do właściwego organu administracji geologicznej (ministra właściwego ds. środowiska). W obu przypadkach projekt robót geologicznych załącza się w dwóch egzemplarzach, a we wniosku należy określić prawo wnioskodawcy do nieruchomości (przestrzeni), w granicach której ma być wykonywana zamierzona działalność.

Zawartość projektu robót geologicznych określono w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji wraz z rozporządzeniem zmieniającym. W rozporządzeniu nie rozróżniono zawartości projektu robót geologicznych w zależności od celu. Projekt robót geologicznych składa się z części tekstowej i graficznej, w tabeli 71 zaproponowano jego formę i treść.

Bardzo istotne jest to, żeby **zawartość merytoryczna projektu robót geologicznych była adekwatna do celu jaki ma spełnić dokumentacja geologiczno-inżynierska**, tj. aby zaprojektowane badania pozwoliły udokumentować i ocenić warunki geologiczno-inżynierskie w związku z projektowaniem obiektu podziemnego.

7.2. ZAWARTOŚĆ DOKUMENTACJI NA POTRZEBY PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA I PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA

Dokumentacja geologiczno-inżynierska sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji (DGI-PMS) lub podziemnego składowania odpadów (DGI-PSO) jest dokumentem (opracowaniem geologicznym), który przedstawia wyniki prac geologicznych wraz z ich interpretacją, określeniem stopnia osiągnięcia zamierzonego celu z uzasadnieniem, a w szczególności określa budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne badanej przestrzeni przeznaczonej do magazynowania lub składowania oraz określa przydatność badanego terenu do realizacji zamierzonego przedsięwzięcia. Wymaga uzyskania prawomocnej decyzji zatwierdzającą przez właściwy organ administracji geologicznej.

Podstawę prawną do opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej stanowi:
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (art. 88 ust. 1, art. 88 ust. 2 pkt 3, art. 91 ust. 1 pkt 3, art. 91 ust 2);
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (§ 2, § 19, § 24) (dalej rozporządzenie dgi);
- Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.

Dodatkowe wymagania w zakresie koniecznych do zaprojektowania badań zawiera opis przedmiotu zamówienia (OPZ) Inwestora/Zamawiającego.

Dodatkowe wymagania w zakresie zawartości dokumentacji zawiera opis przedmiotu zamówienia (OPZ) Inwestora/Zamawiającego.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska jest wymagana:
- do wniosku o udzielenie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie złoża kopaliny (art. 25 ust. 2 pgg);
- do wniosku o udzielenie koncesji na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub podziemne składowanie odpadów.

Zawartość dokumentacji geologiczno-inżynierskiej sporządzanej w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów określa ustawa pgg oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. W tabeli 72 zaproponowano formę i treść dokumentacji geologiczno-inżynierskiej.

7.3. ZAWARTOŚĆ DOKUMENTACJI NA POTRZEBY PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA DWUTLENKU WĘGLA

Dokumentacja geologiczno-inżynierska sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla (DGI-CO_2) jest dokumentem (opracowaniem geologicznym), który przedstawia wyniki prac geologicznych, wraz z ich interpretacją, określeniem stopnia osiągnięcia zamierzonego celu wraz z uzasadnieniem, a w szczególności określa

budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne badanej przestrzeni przeznaczonej do składowania dwutlenku węgla oraz określa przydatność badanego terenu do realizacji zamierzonego przedsięwzięcia. Wymaga uzyskania prawomocnej decyzji zatwierdzającą przez właściwy organ administracji geologicznej.

Podstawę prawną do opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej stanowi:

- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (art. 88 ust. 1, art. 88 ust. 2 pkt 3, art. 91 ust. 1 pkt 3, art. 91 ust 2);
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (§2, §19, §25) (dalej: rozporządzenie dgi);
- Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych.

Dodatkowe wymagania w zakresie zawartości dokumentacji zawiera opis przedmiotu zamówienia (OPZ) Inwestora/Zamawiającego.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska jest wymagana:

- do wniosku o udzielenie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie złoża kopaliny (art. 25 ust. 2 pgg);
- do wniosku o udzielenie koncesji na poszukiwanie lub rozpoznawanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (art. 25 ust. 2 ustawy pgg);
- do wniosku o udzielenie koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla.

Zawartość dokumentacji geologiczno-inżynierskiej sporządzanej w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla określa ustawa pgg oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. W tabeli 73 zaproponowano formę i treść dokumentacji geologiczno-inżynierskiej.

Tabela 71

Zawartość projektu robót geologicznych (PRG)

Strona tytułowa/tytuł rozdziału/ nazwa załącznika	Zawartość strony tytułowej/rozdziału/załącznika
1	**2**
CZĘŚĆ TEKSTOWA	
Strona tytułowa	– nazwa i adres podmiotu, który wykonał PRG – nazwa i adres podmiotu, który zamówił i sfinansował wykonanie PRG – tytuł PRG – imię i nazwisko oraz podpis sporządzającego PRG, a także numer kwalifikacji geologicznych albo numer decyzji uznającej kwalifikacje zawodowe w dziedzinie geologii, albo imię i nazwisko oraz podpis osoby świadczącej usługi transgraniczne i zapis „osoba świadcząca usługi transgraniczne w dziedzinie geologii” – imiona i nazwiska osób wchodzących w skład zespołu, który sporządził PRG oraz ich podpisy – imię, nazwisko i podpis osoby uprawnionej do reprezentowania podmiotu, który sporządził PRG – data sporządzenia PRG
1. Wstęp	– informacje dotyczące instytucji wykonującej, zamawiającej, finansującej PRG oraz o Inwestorze – podstawa formalnoprawna sporządzenia PRG przez wykonawcę (np.: umowa, z jakiego dnia, jaki przedmiot umowy, strony umowy) – nazwa inwestycji, na potrzeby której sporządzono PRG – informacja o etapowości robót geologicznych (jeśli przewidziane)
2. Cel robót geologicznych	– cel zamierzonych robót geologicznych (art. 79. ust. 2. pkt 1 ustawy pgg)
3. Opis projektowanej inwestycji	– charakter obiektu (składowisko, magazyn) oraz jego rodzaj (np. kawernowy) – ogólna charakterystyka obiektu podziemnego z podziałem na część podziemną i naziemną – krótki opis techniczny i technologiczny (sposób wprowadzania odpadu/substancji do górotworu itp.)
4. Lokalizacja i opis zagospodarowania obszaru badań	
4.1. Lokalizacja obszaru badań	– przestrzeń, w obrębie której mają być wykonywane roboty geologiczne (art. 79 ust. 2. pkt 4 ustawy pgg) – informacje dotyczące lokalizacji zamierzonych robót geologicznych, w tym lokalizacji w ramach trójstopniowego podziału terytorialnego państwa (§ 1 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia PRG)
4.2. Zagospodarowanie obszaru badań	– opis zagospodarowania terenu, na którym mają być przeprowadzone roboty (§ 1 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia PRG)
4.3. Obszary chronione i strefy ochronne	– informacje o obiektach i obszarach chronionych występujących na obszarze projektowanych robót geologicznych lub w jego bezpośrednim sąsiedztwie (§ 1 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia PRG) – informacje o strefach ochronnych występujących na obszarze projektowanych robót geologicznych

Tabela 71 cd.

1	2
4.4. Działalność górnicza	– informacje o udokumentowanych złożach kopalin, obszarach i terenach górniczych występujących na obszarze projektowanych robót geologicznych – informacje o historycznej działalności górniczej na obszarze projektowanych robót geologicznych (jeśli dotyczy)
5. Wizja lokalna obszaru badań	– informacje o terenie pozyskane z przeprowadzonej wizji lokalnej wraz z dokumentacją fotograficzną, w tym w szczególności: zmiany terenu w stosunku do informacji pozyskanej z map i dokumentów archiwalnych, aktualny sposób zagospodarowania terenu, występowanie przejawów niekorzystnych zjawisk geologicznych i antropogenicznych utrudniających możliwość wykonania projektowanych robót i inne istotne z punktu widzenia projektowanych robót geologicznych
6. Opis archiwalnych badań i robót geologicznych	– omówienie wyników przeprowadzonych wcześniej robót geologicznych, badań geofizycznych, geologicznych i geochemicznych na obszarze zamierzonych prac geologicznych wraz z ich interpretacją (§ 1 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia PRG) – powołanie się na wykaz wykorzystanych materiałów archiwalnych znajdujących się w spisie – informacja skąd pozyskano materiały archiwalne – informacja o korzystaniu z informacji geologicznej za wynagrodzeniem i/lub bez wynagrodzenia
7. Charakterystyka środowiska geologicznego	
7.1. Geomorfologia	– opis sytuacji geomorfologicznej wraz informacją o jednostkach i formach geomorfologicznych występujących na obszarze projektowanych robót geologicznych
7.2. Warunki hydrologiczne	– opis hydrografii wraz z informacją na terenie, jakich zlewni występuje obszar projektowanych robót geologicznych
7.3. Budowa geologiczna i przewidywane profile geologiczne	– opis budowy geologicznej w rejonie zamierzonych robót geologicznych, wraz z przewidywanymi profilami geologicznymi projektowanych otworów wiertniczych (§ 1 ust. 2 pkt 3 rozporządzenia PRG)
7.3.1. Procesy i zjawiska geologiczne, geologiczno-inżynierskie i geodynamiczne	– opis zjawisk i procesów geologicznych, geologiczno-inżynierskich i geodynamicznych, w szczególności wietrzenia, deformacji filtracyjnych, pełzania, pęcznienia, osiadania zapadowego i innych występujących na obszarze projektowanych badań oraz w jego sąsiedztwie, a także możliwych w obrębie górotworu, bazując na danych archiwalnuch
7.3.2. Procesy i przekształcenia antropogeniczne	– opis procesów antropogenicznych
7.4. Warunki hydrogeologiczne	– opis warunków hydrogeologicznych w rejonie zamierzonych robót geologicznych (§ 1 ust. 2 pkt 3 rozporządzenia PRG), w tym: • opis poziomów wodonośnych występujących na terenie zamierzonych robót geologicznych, informacja o Głównych Zbiornikach Wód Podziemnych występujących na terenie zamierzonych robót geologicznych • informacja o ujęciach wód podziemnych • informacja o występowaniu i hydrodynamice wód podziemnych • informacja o wrażliwości na zanieczyszczenia i jakości wód podziemnych
7.5. Stopień skomplikowania warunków gruntowych w odniesieniu do części naziemnej	– informacja o stopniu skomplikowania warunków gruntowych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych
8. Możliwości osiągnięcia celu robót geologicznych	– informacja na temat sposobu i przedstawienia możliwości osiągnięcia celu robót geologicznych (art. 79 ust. 2. pkt 1 ustawy pgg, § 1 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia PRG).
8.1. Prace wiertnicze	– opis i uzasadnienie liczby, lokalizacji i rodzaju projektowanych otworów wiertniczych (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit a rozporządzenia PRG) – odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane wiercenia
8.1.1. Konstrukcja projektowanych otworów wiertniczych	– opis przewidywanej konstrukcji projektowanych otworów wiertniczych lub wyrobisk (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit b rozporządzenia PRG)
8.1.2. Badania w otworach wiertniczych	– opis przewidywanych do wykonania badań w otworach wiertniczych (geofizycznych, geomechanicznych, hydrogeologicznych i innych) wraz z ich charakterystyką i uzasadnieniem zakresu i metodyki (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit e rozporządzenia PRG)
8.1.3. Opis i oznaczanie gruntów i skał oraz analiza rdzenia wiertniczego	– informacja na temat wymagań w zakresie opisu, oznaczania i klasyfikacji gruntów oraz skał wraz z odniesieniem do właściwej normy – sposób wykonania opisu i oznaczania gruntów i skał – sposób oceny masywu skalnego (jeśli dotyczy) – informacja o sposobie opisu rdzenia wiertniczego wraz z odniesieniem do właściwej normy, – opis przewidywanych do wykonania analiz rdzenia wiertniczego i sposobu oceny masywu skalnego

Tabela 71 cd.

1	2
8.1.4. Opróbowanie otworów wiertniczych	– opis opróbowania otworów wiertniczych, w tym sposób pobierania próbek geologicznych (kategoria i klasa jakości próbki) w podziale na zakres, liczbę i wielkość przewidywanych do pobrania próbek geologicznych (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit f rozporządzenia PRG) w odniesieniu do właściwej normy – zakres przekazania próbek geologicznych podlegających obowiązkowemu przekazaniu państwowej służbie geologicznej, wraz z wykazem przewidywanej liczby, wielkości i rodzaju próbek przewidzianych do badań powodujących całkowite zniszczenie próbek geologicznych oraz badań geomechanicznych powodujących naruszenie integralności calizny rdzenia wiertniczego(§ 1 ust. 2 pkt 5 lit a rozporządzenia PRG) i/lub informacja na jakiej podstawie prawnej próbki nie podlegają przekazaniu państwowej służbie geologicznej
8.1.5. Obserwacje w otworach	– sposób i zakres obserwacji poziomów wód podziemnych (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit g rozporządzenia PRG) – podanie metodyki wykonania obserwacji poziomów wód podziemnych lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane obserwacje poziomów wód podziemnych – sposób i zakres prowadzenia pomiarów ciśnienia i temperatury (jeśli dotyczy)
8.1.6. Przewidywane wielkości dopływu wód oraz sposób odwadniania	– przewidywana wielkość dopływu wód do wyrobiska lub poziomów eksploatacyjnych oraz przewidywana jakość wody odpompowywanej z wyrobiska – sposób odwadniania i odprowadzania wody odpompowywanej z wyrobiska
8.1.7. Instalacja piezometrów (jeśli dotyczy)	– opis i uzasadnienie liczby, lokalizacji i rodzaju projektowanych piezometrów – podanie metodyki wykonania piezometrów lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane piezometry – podanie informacji o prowadzonych obserwacjach w piezometrach, w tym rodzaj obserwacji oraz czas prowadzenia obserwacji
8.1.8. Próbne pompowania (jeśli dotyczy)	– wskazanie otworów wiertniczych, w których zostaną wykonane próbne pompowania – sposób i zakres próbnych pompowań (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit g rozporządzenia PRG) – podanie metodyki wykonania próbnych pompowań lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane próbne pompowania
8.1.9. Sposób zamykania horyzontów wodonośnych	– informacje dotyczące zamykania horyzontów wodonośnych (art. 79 ust. 2. pkt 5 ustawy pgg, § 1 ust. 2 pkt 4 lit c rozporządzenia PRG)
8.1.10. Sposób likwidacji otworów wiertniczych i rekultywacja gruntów	– sposób i termin likwidacji otworów wiertniczych i/lub piezometrów oraz rekultywacji gruntów (art. 79 ust. 2 pkt 5 ustawy pgg, § 1 ust. 2 pkt 4 lit d rozporządzenia PRG)
8.2. Badania i pomiary specjalne. Sondowania dla części naziemnej	– opis i uzasadnienie liczby, lokalizacji i rodzaju projektowanych sondowań (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit g rozporządzenia PRG) – odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane sondowania
8.3. Badania geofizyczne powierzchniowe	– charakterystyka i uzasadnienie zakresu (liczba, rodzaj) oraz metod zamierzonych badań geofizycznych oraz wskazanie ich lokalizacji (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit e rozporządzenia PRG) – podanie metodyki wykonania badań geofizycznych lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane badania geofizyczne
8.4. Badania geochemiczne	– charakterystyka i uzasadnienie zakresu (liczba, rodzaj) metod zamierzonych badań fizykochemicznych wody i gruntów oraz wskazanie ich lokalizacji lub miejsc poboru (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit e rozporządzenia PRG), w tym badań wód podziemnych i powierzchniowych (jeśli dotyczy) – podanie metodyki wykonania badań geochemicznych lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane badania geochemiczne
8.5. Prace geodezyjne	– wyszczególnienie niezbędnych prac geodezyjnych (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit h rozporządzenia PRG) – informacja o sposobie wykonania pomiarów geodezyjnych oraz ich dokładności w odniesieniu do Rozporządzenia Ministra Rozwoju z dnia 18 sierpnia 2020 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego – informacja o układach odniesienia w jakich podano współrzędne x, y i rzędną H w nawiązaniu do rozporządzenia (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012) – informacja skąd pozyskano podkłady map do opracowania załączników (§ 2 rozporządzenia PRG)
8.6. Badania laboratoryjne próbek gruntów i skał	– opis i uzasadnienie zakresu badań laboratoryjnych, ze szczególnym uwzględnieniem badań powodujących całkowite zniszczenie próbek geologicznych oraz badań geomechanicznych powodujących naruszenie integralności calizny rdzenia wiertniczego (§ 1 ust. 2 pkt 4 lit i rozporządzenia PRG) – informacja o kategorii i klasie jakości próbek gruntów i skał wymaganych do badań laboratoryjnych – odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostaną wykonane badania laboratoryjne

Tabela 71 cd.

1	2
8.7. Dozór geologiczny	– informacja o obowiązkach dozoru geologicznego w trakcie wykonywania prac i robót geologicznych
9. Sposób udokumentowania wyników robót geologicznych	– rodzaj dokumentacji geologicznej mającej powstać w wyniku robót geologicznych, o której mowa w art. 88 ust. 2 ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze (art. 79 ust. 2. pkt 2 ustawy pgg, § 1 ust. 2 pkt 5 lit d rozporządzenia PRG)
10. Harmonogram robót geologicznych	– harmonogram zamierzonych robót geologicznych, w tym terminy ich rozpoczęcia i zakończenia (art. 79 ust. 2. pkt 3 ustawy pgg, § 1 ust. 2 pkt 5 lit b rozporządzenia PRG) przedstawiony tabelarycznie w podziale na tygodnie
11. Obowiązki w zakresie rozpoczęcia i dokumentowania robót geologicznych	– informacja o obowiązkach dotyczących zawiadamiania odpowiednich organów i instytucji oraz bieżącego dokumentowania robót geologicznych zgodnie z ustawą pgg
12. Określenie wpływu projektowanych robót geologicznych na środowisko oraz obszary chronione, w tym obszary Natura 2000	– charakterystyka wpływu zamierzonych robót geologicznych na obszary chronione, w tym obszary Natura 2000 (§ 1 ust. 2 pkt 5 lit c rozporządzenia PRG)
13. Wymagania techniczne, technologiczne i organizacyjne prowadzenia robót geologicznych	– opis czynności mających na celu zapobieżenie szkodom powstałym wskutek wykonywania zamierzonych robót geologicznych (art. 79 ust. 2. pkt 5 ustawy pgg) – opis przedsięwzięć technicznych, technologicznych i organizacyjnych, mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa powszechnego, bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska (§ 5 rozporządzenia PRG)
14. Wymagania dotyczące projektu robót geologicznych, które nie mają zastosowania	– informacja o wymaganiach, które nie mają zastosowania w odniesieniu do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji
15. Podsumowanie	– krótkie podsumowanie i informacja na jaki czas ma być zatwierdzony projekt robót geologiczny
16. Spis wykorzystanych materiałów	– spis literatury i materiałów archiwalnych wykorzystanych przy sporządzeniu dokumentu w podziale na: • wykaz aktów prawnych • wykaz norm • wykaz instrukcji, wytycznych, zasad, poradników • wykaz wykorzystanej literatury • wykaz wykorzystanych geologicznych materiałów archiwalnych (§ 1 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia PRG) • wykaz stron internetowych
CZĘŚĆ GRAFICZNA (§ 1 UST. 3 ROZPORZĄDZENIA PRG)	
Załącznik 1. Mapa topograficzna z lokalizacją obszaru projektowanych badań	– mapa topograficzna z zaznaczeniem obszaru zamierzonych robót geologicznych i usytuowania ich w stosunku do granic miejscowości będącej siedzibą gminy lub punktów osnowy geodezyjnej (§ 1 ust. 3 pkt 1 rozporządzenia PRG) dla obszarów lądowych – mapa morska nawigacyjna – dla obszarów morskich RP
Załącznik 2. Mapa sytuacyjno-wysokościowa z lokalizacją miejsc projektowanych badań	– mapa sytuacyjno-wysokościowa umożliwiająca szczegółowe przedstawienie lokalizacji obszaru i miejsc zamierzonych robót geologicznych (§ 1 ust. 3 pkt 2 lit a rozporządzenia PRG), na mapie należy zaznaczyć obszary i obiekty ograniczające wykonywanie robót geologicznych (§ 1 ust. 3 pkt 4 rozporządzenia PRG), w tym aktualne granice obszarów chronionych, tereny górnicze, infrastrukturę podziemną i naziemną oraz inne w zależności od potrzeb – mapa sytuacyjno-batymetryczna – dla obszarów morskich RP
Załącznik 3. Szczegółowa mapa geologiczna	– mapa geologiczna w skali 1: 50 000 z przedstawieniem obszaru projektowanych badań oraz miejsc wykonania archiwalnych robót geologicznych, badań geofizycznych, geologicznych, geochemicznych i innych (§ 1 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia PRG, § 1 ust. 3 pkt 1 rozporządzenia PRG)
Załącznik 4. Mapa hydrogeologiczna	– mapa hydrogeologiczna w skali 1:50 000 z przedstawieniem obszaru projektowanych badań oraz miejsc wykonania archiwalnych robót geologicznych, badań geofizycznych, geologicznych, geochemicznych i innych (§ 1 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia PRG, § 1 ust. 3 pkt 1 rozporządzenia PRG)
Załącznik 5. Mapa geośrodowiskowa	– mapa geośrodowiskowa przedstawiająca składniki środowiska podlegające ochronie sporządzona w skali 1:50 000 (§ 1 ust. 3 pkt 2 lit b rozporządzenia PRG)
Załącznik 6. Mapa geologiczno-inżynierska	– przeglądowa mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:300 000 lub większej (jeśli dostępna), z przedstawieniem obszaru projektowanych badań oraz miejsc wykonania archiwalnych robót geologicznych, badań geofizycznych, geologicznych, geochemicznych i innych (§ 1 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia PRG, § 1 ust. 3 pkt 1 rozporządzenia PRG)
Załącznik 7. Przekrój geologiczny	– przekrój geologiczny sporządzony na podstawie danych archiwalnych lub archiwalny przekrój geologiczny (§ 1 ust. 3 pkt 1, § 1 ust. 3 pkt 2 lit c rozporządzenia PRG)

Tabela 71 cd.

1	2
Załącznik 8. Przewidywane profile geologiczne i techniczne projektowanych otworów wiertniczych, wraz ze wskazaniem przewidywanej lokalizacji miejsc opróbowania i badań otworowych	– przewidywane profile geologiczne i techniczne (konstrukcja otworu) projektowanych otworów wiertniczych lub wyrobisk wraz ze wskazaniem przewidywanej lokalizacji miejsc opróbowania (§ 1 ust. 3 pkt 3 rozporządzenia PRG)
Załącznik 9. Wykaz badań archiwalnych	– tabelaryczny wykaz archiwalnych badań, m.in. otworów wiertniczych, sondowań, badań geofizycznych z podaniem współrzędnych x, y, rzędnej H w nawiązaniu do rozporządzenia do dokumentu źródłowego
Załącznik 10. Tabelaryczne zestawienie projektowanych badań	– tabelaryczne zestawienie projektowanych badań, w tym m.in. otworów wiertniczych, sondowań, badań geofizycznych z podaniem współrzędnych x, y w układzie współrzędnych PL-2000 zgodnie z rozporządzeniem oraz numeru działki ewidencyjnej, na której je zaprojektowano
Załącznik...	– w zależności od potrzeb kolejne załączniki zawierające np. decyzje środowiskowe, specjalne zgody i inne

Załączniki, będące integralną częścią projektu robót geologicznych, powinny zawierać m.in.: imię i nazwisko osób opracowujących i sprawdzających załącznik, daty wykonania badań, imiona i nazwiska osób wykonujących badania.

Mapy, załączane do projektu robót geologicznych, w zależności od wymagań, rodzaju, potrzeb i skali należy sporządzać na podkładzie map topograficznych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub na mapie sytuacyjno-wysokościowej sporządzonej na podstawie danych i informacji uzyskanych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub innych podkładach w zależności od wymagań szczególnych wynikających z przepisów prawa. Mapy należy opracować w obowiązującym układzie współrzędnych zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych.

Wszystkie mapy dołączane do projektu robót geologicznych muszą mieć:
- elementy kartograficzne: symbol wskazujący północ, siatkę kartograficzną z opisem współrzędnych lub 4 krzyże opisujące współrzędne, skalę i podziałkę metryczną;
- ramkę zawierającą: numer załącznika (unikatowy identyfikator), tytuł załącznika (tytuł mapy), nazwę Inwestora, nazwę Projektanta (jeżeli wyłoniony), nazwę Wykonawcy, nazwę inwestycji, imię i nazwisko osoby wykonującej i sprawdzającej załącznik, nazwę układu współrzędnych, skalę mapy;
- objaśnienia zawierające elementy przedstawione na mapie;
- skorowidz arkuszy map przedstawionych na kolejnych załącznikach.

Na mapach należy przedstawić informacje/dane istotne z uwagi na specyfikę obszaru badań lub treść mapy. Na mapach zawsze należy przedstawić obrys lub przebieg inwestycji wraz z kilometrażem lub przebieg wariantów linii transportowych, przesyłowych, obiekty inżynieryjne oraz inne obiekty budowlane w zależności od potrzeb.

Tabela 72

Zawartość dokumentacji geologiczno-inżynierskiej sporządzanej w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów

Strona tytułowa/tytuł rozdziału/ nazwa załącznika	Zawartość strony tytułowej/rozdziału/załącznika
1	**2**
Strona tytułowa	– nazwa i adres podmiotu, który wykonał dokumentację – nazwa i adres podmiotu, który zamówił i sfinansował wykonanie dokumentacji – tytuł dokumentacji – imię i nazwisko oraz podpis sporządzającego dokumentację, a także numer kwalifikacji geologicznych albo numer decyzji uznającej kwalifikacje zawodowe w dziedzinie geologii, albo imię i nazwisko oraz podpis osoby świadczącej usługi transgraniczne i napis „osoba świadcząca usługi transgraniczne w dziedzinie geologii” – imiona i nazwiska osób wchodzących w skład zespołu, który sporządził dokumentację oraz ich podpisy – imię, nazwisko i podpis osoby uprawnionej do reprezentowania podmiotu, który sporządził dokumentację – data sporządzenia dokumentacji
CZĘŚĆ OPISOWA DOKUMENTACJI (§ 2 UST. 3 PKT 4, § 19 UST. 1, § 24 UST. 1 ROZPORZĄDZENIA dgi)	
1. Kopia decyzji zatwierdzającej projekt robót geologicznych	– kopia decyzji zatwierdzającej projekt robót geologicznych oraz kopie decyzji zatwierdzające dodatki do projektu robót geologicznych (§ 2 ust. 3 pkt 3 rozporządzenia dgi)
2. Karta informacyjna dokumentacji geologiczno-inżynierskiej	– karta informacyjna dokumentacji geologiczno-inżynierskiej opracowana zgodnie z wzorem z załącznika nr 6 rozporządzenia dgi (§ 2 ust. 4 pkt 6 rozporządzenia dgi) – karta ma zawierać wszystkie elementy zgodne ze wzorem, jeśli jakiś badań nie wykonywano należy wpisać „nie wykonywano”; karta musi być opatrzona podpisem osoby odpowiedzialnej za sporządzenie dokumentacji
3. Kopia dokumentu potwierdzającego istnienie prawa do korzystania z informacji geologicznej	– kopia dokumentu potwierdzającego istnienie prawa do korzystania z informacji geologicznej, którą wykorzystano przy sporządzaniu danej dokumentacji, z uwzględnieniem przepisu art. 205 ust. 3 ustawy pgg (§ 24 ust. 1 pkt 18 rozporządzenia dgi)
4. Wstęp	– informacje dotyczące instytucji wykonującej, zamawiającej, finansującej DGI oraz Inwestorze – podstawa formalnoprawna sporządzenia DGI przez wykonawcę (np.: umowa, z jakiego dnia, jaki przedmiot umowy, strony umowy, opis przedmiotu zamówienia [jeśli dotyczy], przywołane przepisy prawa) – nazwa projektowanej inwestycji (§ 24 ust. 1 pkt 1 rozporządzenia dgi) – podstawa formalnoprawna wykonania robót geologicznych (przywołany przepis prawa, wymienione wszystkie decyzje zatwierdzające projekt robót geologicznych oraz dodatki do projektu z datą wydania i przez kogo wydane) – informacje o etapowości robót geologicznych oraz zmianach wprowadzonych do projektu robót – informacje o zawartości dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (art. 88 ust. 1 ustawy pgg) – informacja, że mapy zostały opracowane na podkładach pozyskanych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego
5. Stopień osiągnięcia zamierzonego celu prac geologicznych	– określenie stopnia osiągnięcia zamierzonego celu prac geologicznych wraz z uzasadnieniem (art. 91 ust. 1 ustawy pgg) – tabelaryczne zestawienie informacji, jakie prace i roboty geologiczne zaprojektowano, a jakie zostały wykonane – informacja o wszelkich odstępstwach i zmianach dotyczących m.in. lokalizacji prac i robót geologicznych, liczby badań, głębokości badań, metod badań, liczby pobranych próbek gruntów, skał, wód, kategorii i klasy jakości próbek gruntów i skał i in. w zależności od potrzeb wraz z uzasadnieniem
6. Lokalizacja i opis zagospodarowania dokumentowanego obszaru	
6.1. Położenie geograficzne i administracyjne dokumentowanego obszaru	– informacje dotyczące lokalizacji obszaru przedsięwzięcia – opis położenia geograficznego i administracyjnego dokumentowanego obszaru, w tym lokalizacji w ramach trójstopniowego podziału terytorialnego państwa (§ 19 ust. 1 pkt 1 rozporządzenia dgi)
6.2. Zagospodarowanie dokumentowanego obszaru	– ogólne informacje o dokumentowanym obszarze dotyczące jego zagospodarowania z uwzględnieniem istniejącej infrastruktury podziemnej (§ 19 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia dgi)
6.3. Obiekty i obszary chronione oraz strefy ochronne	– informacje o obiektach i obszarach chronionych występujących na obszarze projektowanej inwestycji i w jego bezpośrednim sąsiedztwie – informacje o strefach ochronnych występujących na obszarze projektowanej inwestycji

Tabela 72 cd.

1	2
6.4. Działalność górnicza	– informacje o udokumentowanych złożach kopalin, obszarach i terenach górniczych występujących na obszarze projektowanej inwestycji – opis przebiegu eksploatacji złoża lub podziemnego wyrobiska górniczego przewidzianego do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów (§ 24 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi) – informacje o historycznej działalności górniczej na obszarze projektowanej inwestycji (jeżeli dotyczy)
7. Informacje dotyczące projektowanej inwestycji	
7.1. Charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych projektowanej inwestycji	– informacje o wymaganiach techniczno-budowlanych projektowanej inwestycji (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) oraz charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych projektowanej inwestycji (§ 24 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia dgi) – charakterystykę projektowanej inwestycji z podziałem na (§ 24 ust. 1 pkt 12 rozporządzenia dgi): • część naziemną • otwór wiertniczy lub szyb zakładu górniczego, z opisem ich konstrukcji i oceną ich stanu technicznego • część podziemną, z oceną chłonności i szczelności górotworu w otoczeniu złoża lub wyrobiska górniczego – rodzaj i ilość, podział i charakterystyka substancji przewidzianych do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania lub odpadów przewidzianych do podziemnego składowania, z podaniem rodzaju tych odpadów zgodnie z przepisami o odpadach (§ 24 ust. 1 pkt 2 i pkt 11 rozporządzenia dgi) – opis sposobu lub wariantowych symulacji wtłaczania substancji przewidzianych do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania lub odpadów przewidzianych do podziemnego składowania, wykonanych przy uwzględnieniu modelowania cyfrowego zmian zachodzących w górotworze w wyniku tego wtłaczania (§ 24 ust. 1 pkt 2 i pkt 13 rozporządzenia dgi) – określenie planowanego okresu magazynowania substancji lub składowania odpadów
7.2. Stopień skomplikowania warunków gruntowych dla części naziemnej projektowanej inwestycji	– informacje o warunkach gruntowych w zależności od stopnia ich skomplikowania (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych
7.3. Kategoria geotechniczna projektowanej inwestycji	– podane przez Projektanta/Projektanta geotechnicznego informacje o kategorii geotechnicznej projektowanej inwestycji (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) w odniesieniu do Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych
8. Wykonane badania i prace geologiczne, w tym roboty geologiczne	– w każdym podrozdziale w zależności od rodzaju badań i prac należy podać: • opis prac i badań, w tym opis badań wykonanych dla projektowanej inwestycji lub etapu jej realizacji ustalonego w projekcie robót geologicznych • wyniki prac i badań, w tym wyniki robót geologicznych wraz z ich interpretacją (art. 88 ust. 1 ustawy pgg)
8.1. Badania oraz prace i roboty geologiczne wykonane w ramach opracowań archiwalnych	– omówienie wyników przeprowadzonych wcześniej: • robót geologicznych • badań geofizycznych • badań geologicznych • badań geochemicznych • badań środowiskowych • badań geotechnicznych • badań innych na dokumentowanym obszarze wraz z ich interpretacją – powołanie się na wykaz wykorzystanych geologicznych materiałów archiwalnych znajdujących się w spisie – informacja skąd pozyskano materiały archiwalne – informacja o korzystaniu z informacji geologicznej za wynagrodzeniem i/lub bez wynagrodzenia
8.2. Prace geodezyjne	– opis wykonanych prac geodezyjnych – informacja o sposobie wykonania pomiarów geodezyjnych oraz ich dokładności w odniesieniu do rozporządzenia (Rozporządzenie Ministra Rozwoju..., 2020) – informacja o układach odniesienia w jakich podano współrzędne x, y i rzędną H w nawiązaniu do rozporządzenia (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012) – informacja skąd pozyskano podkłady map do opracowania załączników graficznych (§ 2 ust. 6 rozporządzenia dgi)
8.3. Prace kartograficzne	– wyniki geologiczno-inżynierskich prac kartograficznych umożliwiające sporządzenie mapy geologiczno-inżynierskiej – opis obserwacji terenowych przeprowadzonych w rejonie projektowanego obiektu

Tabela 72 cd.

1	2
8.4. Badania geofizyczne	– charakterystyka i zakres (liczba, rodzaj) wykonanych badań geofizycznych oraz wskazanie ich lokalizacji – podanie metodyki wykonania badań geofizycznych lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane badania geofizyczne
8.4.1. (rodzaj badania geofizycznego)	każde badanie geofizyczne opisać w oddzielnym rozdziale
8.5. Prace wiertnicze	– opis i ocena zakresu wykonanych otworów wiertniczych (wyrobisk badawczych), w tym: liczba, lokalizacja i rodzaj wykonanych otworów wiertniczych – podanie metodyki wykonania wierceń lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane wiercenia – informacje na temat techniki wierceń, czy były wykonywane z wykorzystaniem płuczki, konstrukcji wierceń, w tym średnicy otworów wiertniczych, średnicy rur osłonowych, rodzaju użytych narzędzi wiertniczych, informacji dotyczących zamykania horyzontów wodonośnych, sposób i terminu likwidacji otworów wiertniczych oraz rekultywacji gruntów i inne istotne informacje – opis opróbowania otworów wiertniczych, w tym sposób pobierania próbek gruntów, skał i wód, zakres, liczba i wielkość pobranych próbek w odniesieniu do normy PN-EN ISO 22475-1:2022-04 i PN-EN 1997-2:2009 – zakres przekazania próbek geologicznych podlegających obowiązkowemu przekazaniu państwowej służbie geologicznej, wraz z wykazem zawierającym liczbę, wielkości i rodzaj próbek przekazanych do badań powodujących całkowite zniszczenie próbek geologicznych oraz badań geomechanicznych powodujących naruszenie integralności calizny rdzenia wiertniczego i/lub informacja na jakiej podstawie prawnej próbki nie podlegają przekazaniu państwowej służbie geologicznej
8.5.1. Opis i oznaczanie gruntów i skał	– informacja o opisie i oznaczaniu gruntów i skał wraz z odniesieniem do normy PN-EN ISO 14688-1:2018-05 – informacja o opisie rdzenia wiertniczego wraz z odniesieniem do normy PN-EN ISO 14689:2018-05
8.5.2. Obserwacje poziomów wód podziemnych	– podanie metodyki wykonania obserwacji poziomów wód podziemnych i odniesienie do dokumentu (np. norma, procedura, pozycja literatury), na podstawie której zostały wykonane obserwacje poziomów wód podziemnych – ustalenie głębokości położenia zwierciadeł wód podziemnych, zwłaszcza w obszarze projektowanego zbiornika
8.6. Sondowania	– dla każdego wykonanego rodzaju sondowania sporządzić podrozdział, w którym należy podać: • opis i ocenę zakresu wykonanych sondowań, w tym liczbę, lokalizację oraz rodzaj wykonanych sondowań • odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane sondowania lub jeśli nie ma normy, opisać metodykę wykonania sondowań • wartości mierzone podczas sondowań • stosowane korelacje do interpretowania wyników sondowań, zwłaszcza współczynniki empiryczne w podziale na wydzielone warstwy gruntów i skał wraz z uzasadnieniem • wartości wyprowadzone, uzyskane z sondowań
8.6.1. (rodzaj sondowania)	każde sondowanie opisać w oddzielnym rozdziale
8.7. Badania geochemiczne	– charakterystyka i ocena zakresu (liczba, rodzaj) wykonanych badań geochemicznych oraz wskazanie lokalizacji ich wykonania lub miejsc pobrania próbek, zwłaszcza próbek wód podziemnych, – opisane metodyki wykonania badań geochemicznych lub odniesienie do właściwej normy/procedury, na podstawie której zostały wykonane badania geochemiczne – ocena wpływu agresywności wód podziemnych na materiały konstrukcyjne, które zostaną użyte do wykonania projektowanego obiektu budowlanego (jeśli możliwe); podać uzasadnienie, dlaczego nie oceniono wpływu agresywności wód podziemnych na materiały konstrukcyjne, które zostaną użyte do wykonania projektowanej inwestycji (jeśli dotyczy) jeśli badania nie były wykonywane, rozdział należy zostawić i zapisać, że badań geochemicznych nie wykonywano
8.8. Badania laboratoryjne próbek gruntów, skał	– dla każdego wykonanego rodzaju badania laboratoryjnego sporządzić podrozdział, w którym należy podać: • opis i ocenę zakresu wykonanych badań laboratoryjnych • informację o kategorii i klasie jakości próbek gruntów i skał wymaganych do badań laboratoryjnych • odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane badania laboratoryjne lub jeśli nie ma normy, opisać metodykę wykonania badań • wartości mierzone podczas badań laboratoryjnych • wartości wyprowadzone uzyskane z badań laboratoryjnych • stosowane korelacje do interpretowania wyników badań laboratoryjnych, zwłaszcza nomogramy, współczynniki empiryczne w podziale na wydzielone warstwy gruntów i skał wraz z uzasadnieniem • stosowane klasyfikacje w zależności od badanej cechy/parametru gruntu, skały, np. norma PN-EN ISO 14688-2:2018-05

Tabela 72 cd.

1	2
8.8.1. Opis i oznaczanie gruntów i skał	– określić sposób opisu i oznaczania gruntów i skał
8.8.2. Klasyfikowanie gruntów i skał	– określić sposób klasyfikowania gruntów i skał
8.8.3. Badania akustyczne	– opisać zakres i metodykę wykonanych badań akustycznych
8.8.4. (kolejny rodzaj badania laboratoryjnego)	– każde badanie opisać w oddzielnym rozdziale
9. Opis środowiska geologicznego	
9.1. Geomorfologia	– opis sytuacji geomorfologicznej wraz z informacją o jednostkach i formach geomorfologicznych występujących na obszarze wykonanych robót geologicznych – charakterystyka spadków terenu
9.2. Warunki hydrologiczne	– opis hydrografii wraz z informacją na terenie, jakich zlewni występuje obszar wykonanych robót geologicznych
9.3. Budowa geologiczna	– opis budowy geologicznej określonej przestrzeni (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg), z uwzględnieniem: • tektoniki, krasu, litologii i genezy warstw (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) • charakterystyki warstw izolujących i wodonośnych oraz ich właściwości fizyczno-mechanicznych, a także warunków izolacji struktury chłonnej (§ 24 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi)
9.3.1. Procesy i zjawiska geologiczne, geologiczno-inżynierskie i geodynamiczne	– przedstawienie i opis występujących w określonej przestrzeni i w jej sąsiedztwie zjawisk i procesów geologicznych, geologiczno-inżynierskich i geodynamicznych, w szczególności wietrzenia, deformacji filtracyjnych, pełzania, pęcznienia, osiadania zapadowego i in. (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) oraz ocenę wielkości wpływu tych procesów na realizację tego obiektu – opis procesów krasowych i sufozyjnych w rejonie projektowanej inwestycji (§ 24 ust. 1 pkt 5 rozporządzenia dgi) – ocena występowania wstrząsów w górotworze, w którym ma być zlokalizowana projektowana inwestycja (§ 24 ust. 1 pkt 14 rozporządzenia dgi)
9.3.2. Procesy i przekształcenia antropogeniczne	– przedstawienie i opis występujących w określonej przestrzeni i w jej sąsiedztwie przekształceń i procesów antropogenicznych (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) oraz ocenę wielkości ich wpływu na projektowany obiekt
9.4. Warunki hydrogeologiczne	– opis warunków hydrogeologicznych górotworu, w którym przewiduje się podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub składowanie odpadów oraz skał i gruntów ograniczających przeznaczoną do inwestycji część górotworu (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 6 rozporządzenia dgi), w tym: • charakterystyka poziomów wodonośnych z oceną możliwości ich zanieczyszczenia w wyniku realizacji projektowanej inwestycji (§ 24 ust. 1 pkt 15 rozporządzenia dgi) • określenie parametrów hydrogeologicznych górotworu, w tym porowatość i przepuszczalność, • określenie szczelności nadkładu • informacja o Głównych Zbiornikach Wód Podziemnych występujących na obszarze wykonanych robót geologicznych • informacja o ujęciach wód podziemnych • informacja o występowaniu i hydrodynamice wód podziemnych
10. Charakterystyka wydzielonych zespołów gruntów i skał	– charakterystyka wydzielonych zespołów gruntów i skał, w tym serii litologiczno-genetycznych – w charakterystyce serii litologiczno-genetycznych należy ująć: • wiek geologiczny (stratygrafię) • środowisko depozycji (genezę) • wykształcenie litologiczne (litologię) • wiodący/e parametr/y fizyczno-mechaniczny/e, który/e zastosowano do wydzielenie serii litologiczno-genetycznych • inne w zależności od potrzeb
11. Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów i skał	– wykaz właściwości fizyczno-mechanicznych określonych dla serii litologiczno-genetycznych w podziale na: • właściwości chemiczne • właściwości fizyczne zwłaszcza przepuszczalność, porowatość i szczelinowatość • właściwości wytrzymałościowe • właściwości odkształceniowe • właściwości akustyczne • inne w zależności od potrzeb – opis i ocena właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał tworzących zespoły gruntów i skał, w tym serii litologiczno-genetycznych (§ 19 ust. 1 pkt 5) z uwzględnieniem ww. podziału właściwości fizyczno-mechanicznych – wyniki badań właściwości skał kolektorskich i ich osłony, w tym fizyczno-mechaniczne i akustyczne, oraz wpływ chemizmu odpadów przewidzianych do podziemnego składowania na skałę zbiornikową (§ 24 ust. 1 pkt 9 rozporządzenia dgi)

Tabela 72 cd.

1	2
cd. 11. Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów i skał	– tabelaryczne zestawienie właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał w podziale na wydzielone serie litologiczno-genetyczne z uwzględnieniem ww. podziału właściwości fizyczno-mechanicznych – tabelaryczne zestawienie właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał powinno zawierać następujące informacje dla każdej wydzielonej serii litologiczno-genetycznej: • liczba oznaczeń • minimum • maksimum • średnia • moda • mediana • odchylenie standardowe
12. Warunki geologiczno-inżynierskie oraz prognoza wpływu projektowanej inwestycji na środowisko gruntowo-wodne	– opis i ocena warunków geologiczno-inżynierskich części podziemnej wraz z prognozą wpływu projektowanej inwestycji na środowisko gruntowo-wodne (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi), w tym: • geologiczno-inżynierska charakterystyka złoża i jego nadkładu, w szczególności przepuszczalność (porowatość i szczelinowatość), uzyskaną na podstawie badań lub materiałów archiwalnych, z uwzględnieniem danych z sąsiednich złóż o podobnych właściwościach zbiornikowych (§ 24 ust. 1 pkt 8 rozporządzenia dgi) • geologiczno-inżynierska charakterystyka wyrobiska górniczego z uwzględnieniem możliwości uszczelnienia otaczającego je górotworu (§ 24 ust. 1 pkt 10 rozporządzenia dgi) • charakterystyka ciśnień: złożowego, zatłaczania, szczelinowania i innych według potrzeb – opis i ocena warunków geologiczno-inżynierskich części naziemnej wraz z prognozą wpływu projektowanej inwestycji na środowisko gruntowo-wodne (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi), należy wykonać w przypadku, gdy dokumentacja, poza rozpoznawaniem geologiczno-inżynierskim części podziemnej zawiera rozpoznanie podłoża gruntowo-wodnego na powierzchni terenu, w związku z posadowieniem obiektów budowlanych, jeżeli nie jest opracowywana na te potrzeby osobna dokumentacja (art. 91 ust. 1 pkt 2 ustawy pgg) i powinna ujmować: • warunki geomorfologiczne • warunki hydrogeologiczne • warunki geologiczne z uwzględnieniem właściwości fizyczno-mechanicznych wydzielonych serii litologiczno-genetycznych • procesy i zjawiska geologiczne, geologiczno-inżynierskie i geodynamiczne • procesy i przekształcenia antropogeniczne • inne w zależności od potrzeb
13. Przydatność badanego obszaru do realizacji inwestycji	– przydatność badanego obszaru do realizacji zamierzonych przedsięwzięć (art. 91 ust. 2 pkt 2 ustawy pgg)
14. Ocena możliwości wykonania projektowanej inwestycji	– ocena możliwości wykonania projektowanej inwestycji z charakterystyką zagrożeń na etapie jej budowy, eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii (§ 24 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi).
15. Prognoza zmian w środowisku oraz ocena zagrożeń dla środowiska	– ocena stanu środowiska, w tym warunków gruntowo-wodnych – ocena zagrożeń dla środowiska w wyniku podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów, na etapie budowy projektowanej inwestycji, jej eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii (§ 24 ust. 1 pkt 6 rozporządzenia dgi) – prognoza wpływu i przewidywanych zmian w środowisku (w tym warunków gruntowo-wodnych), które mogą powstać na skutek realizacji, funkcjonowania oraz likwidacji zamierzonych przedsięwzięć - jeżeli nie istnieje obowiązek sporządzenia raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko zgodnie z odrębnymi przepisami (art. 91 ust. 2 pkt 3 ustawy pgg, § 24 ust. 1 pkt. 16 rozporządzenia dgi) – jeśli nie była wymagana prognoza, powołać się i odnieść do raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, wskazując kiedy został opracowany raport, kto go opracował oraz główne jego założenia (art. 91 ust. 2 pkt 3 ustawy pgg) – określenie zasięgu proponowanego obszaru oraz terenu górniczego
16. Zalecenia dotyczące prowadzenia monitoringu	– zalecenia dla podmiotu, który zamówił dokumentację, dotyczące prowadzenia monitoringu projektowanej inwestycji na etapie przed jej eksploatacją, w trakcie eksploatacji oraz wstępne zalecenia dotyczące etapu jej likwidacji i po zakończeniu tej likwidacji (§ 24 ust. 1 pkt. 17 rozporządzenia dgi)
17. Złoża kopalin przydatne do realizacji projektowanej inwestycji	– informacje o lokalizacji i zasobach złóż kopalin, które mogą być wykorzystane przy wykonywaniu projektowanej inwestycji, oraz ich jakości (§ 19 ust. 1 pkt 8 rozporządzenia dgi) (jeśli dotyczy). Podać uzasadnienie, dlaczego nie podano informacji o lokalizacji i zasobach złóż kopalin, które mogą być wykorzystane przy wykonywaniu projektowanej inwestycji, oraz ich jakości
18. Podsumowanie	– krótkie podsumowanie w nawiązaniu do każdego rozdziału – wskazanie wymagań rozporządzenia dgi, które nie mają zastosowania, zwłaszcza w zakresie załączników graficznych

Tabela 72 cd.

1	2
19. Spis literatury i materiałów archiwalnych	– spis literatury i materiałów archiwalnych wykorzystanych przy sporządzeniu dokumentacji (§ 2. ust. 3 pkt 5 rozporządzenia dgi), w podziale na: • wykaz aktów prawnych • wykaz norm • wykaz instrukcji, wytycznych, zasad, poradników • wykaz wykorzystanej literatury • wykaz wykorzystanych geologicznych materiałów archiwalnych • wykaz stron internetowych
CZĘŚĆ GRAFICZNA	do dokumentacji należy dołączyć załączniki podane poniżej (§ 2 ust. 1 rozporządzenia dgi; § 25 ust. 2 rozporządzenia dgi)
Załącznik 1. Mapa przeglądowa z lokalizacją obszaru badań	– mapa z lokalizacją dokumentowanego obszaru (§ 2 ust. 6 rozporządzenia dgi, § 19 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia dgi)
Załącznik 2. Mapa dokumentacyjna	– mapa topograficzna z naniesioną lokalizacją: dokumentowanego obszaru, linii przekrojów geofizycznych (jeśli wykonywane), linii przekrojów geologiczno-inżynierskich, miejsc punktów dokumentacyjnych (§ 19 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia dgi) oraz proponowanymi granicami obszaru i terenu górniczego dla podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów (§ 24 ust. 2 pkt. 1 rozporządzenia dgi)
Załącznik 3. Mapa strukturalna lub tektoniczna	– w zależności od obszaru badań mapa przedstawiająca np.: • granice struktur geologicznych • strop, spąg formacji geologicznej służącej za zbiornik magazynujący • liniowe przedstawienie form tektonicznych: uskoków, dyslokacji, nasunięć, rowów • informacje dotyczące warstwowań i foliacji Najczęściej mapa ma formę mapy ścięciowej, tj. horyzontu stropu górotworu przeznaczonego do bezzbiornikowego magazynowania substancji lub podziemnego składowania odpadów (§ 24 ust. 2 pkt. 3 rozporządzenia dgi)
Załącznik 4. Mapa hydrogeologiczna	– na mapie należy przedstawić poziomy wodonośne, głębokość ich występowania oraz ich miąższość (§ 24 ust. 2 pkt. 4 rozporządzenia dgi)
Załącznik 5. Mapa geologiczno-inżynierska	– mapa geologiczno-inżynierska (§ 19 ust. 2 pkt 3 rozporządzenia dgi) obejmuje obszar badań i jego sąsiedztwo – w przypadku części naziemnej, przedstawia cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na posadowienie obiektów budowlanych na powierzchni. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie, należy wziąć pod uwagę geomorfologię, budowę geologiczną, w tym tektonikę, sposób i charakter wykształcenia gruntów i skał, ich cechy fizyczno-mechaniczne, występowanie i charakter wód podziemnych oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne (Jakubicz, Łozińska, 1988 zmienione) – w przypadku części podziemnej, przedstawia cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na zagospodarowanie przestrzeni podziemnej (strefy górotworu) przeznaczonej na obiekt podziemny. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie dla części podziemnej, należy wziąć pod uwagę budowę geologiczną, w tym czynniki strukturalne i geodynamiczne, warunki hydrogeologiczne oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne występujące lub mogące wystąpić w górotworze
Załącznik 6. Mapa wyrobisk górniczych	– mapa wyrobisk górniczych przedstawiająca sytuację wyrobisk górniczych, elementy geologiczne oraz inne elementy górnicze związane z prowadzeniem robót górniczych, w tym również sytuację na powierzchni (§ 24 ust. 2 pkt. 2 rozporządzenia dgi)
Załącznik 7. Mapy tematyczne [podać nazwę mapy]	– mapy tematyczne przedstawiające istotne cechy, parametry górotworu, w którym przewiduje się wybudować obiekt podziemny, np.: • mapa porowatości • mapa przepuszczalności • mapa miąższości kolektora – mapy obrazujące rozłożenie danego parametru najlepiej przedstawiać w postaci izoliniowej
Załącznik 8. Przekroje geofizyczne	– przekroje geofizyczne oraz geofizyczno-geologiczne z naniesionymi profilami otworów wiertniczych, w podziale na rodzaj badania geofizycznego
Załącznik 9. Przekroje geologiczno-inżynierskie	– przekroje geologiczno-inżynierskie z naniesionymi wykresami sondowań statycznych i dynamicznych (jeśli były wykonywane) (§ 19 ust. 2 pkt 5 rozporządzenia dgi) i innych sondowań
Załącznik 10. Profil geologiczny złoża	– profil geologiczny złoża z charakterystyką geologiczno-inżynierską warstw (§ 24 ust. 2 pkt 5 rozporządzenia dgi)
Załącznik 11. Tabelaryczne zestawienie wyników badań	– tabelaryczne zestawienie wyników badań laboratoryjnych i terenowych (§ 19 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia dgi)

Tabela 72 cd.

1	2
Załącznik 12. Profile otworów wiertniczych	– profile otworów wiertniczych, w jednej skali, wraz z określeniem ich rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012) – dokumentacja fotograficzna rdzeni i pobranych próbek gruntów i skał
Załącznik 13. Plany wyrobisk (jeżeli wykonywano)	– plany wyrobisk zawierające odwzorowania ich ścian, w jednej skali, wraz z określeniem ich rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012)
Załącznik 14. Karty sondowań	– karty sondowań wraz z ich wykresami i interpretacją, opracowane w jednej skali, wraz z określeniem rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 4, § 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012)
Załącznik 15. Karty badań laboratoryjnych	– karty badań laboratoryjnych lub/i raporty z badań laboratoryjnych z wykresami uzyskanymi z badań uziarnienia, wytrzymałościowych i odkształceniowych (§ 19 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia dgi) oraz wszystkich innych badań wraz z interpretacją w podziale na każdy rodzaj wykonanego badania laboratoryjnego
Załącznik...	– w zależności od potrzeb kolejne załączniki zawierające np. decyzje środowiskowe, specjalne zgody i inne

Załączniki będące integralną częścią dokumentacji geologiczno-inżynierskiej powinny zawierać m.in. następujące informacje: imię i nazwisko osób opracowujących i sprawdzających załącznik, daty wykonania badań, imiona i nazwiska osób wykonujących badania.

Mapy, załączane do dokumentacji, w zależności od wymagań, rodzaju, potrzeb i skali należy sporządzać na podkładzie map topograficznych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub na mapie sytuacyjno-wysokościowej sporządzonej na podstawie danych i informacji uzyskanych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub innych podkładach w zależności od wymagań szczególnych wynikających z przepisów prawa. Mapy należy opracować w obowiązującym układzie współrzędnych zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych.

Wszystkie mapy dołączane do dokumentacji muszą mieć:
- elementy kartograficzne: symbol wskazujący północ, siatkę kartograficzną z opisem współrzędnych lub 4 krzyże opisujące współrzędne, skalę i podziałkę metryczną;
- ramkę zawierającą: numer załącznika (unikatowy identyfikator), tytuł załącznika (tytuł mapy), nazwę Inwestora, nazwę Projektanta (jeżeli wyłoniony), nazwę Wykonawcy, nazwę inwestycji, imię i nazwisko osoby wykonującej i sprawdzającej załącznik, nazwę układu współrzędnych, skalę mapy;
- objaśnienia zawierające elementy przedstawione na mapie;
- skorowidz arkuszy map przedstawionych na kolejnych załącznikach.

Na mapach należy przedstawić informacje/dane istotne z uwagi na specyfikę obszaru badań lub treść mapy.

Tabela 73

Zawartość dokumentacji geologiczno-inżynierskiej sporządzonej w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla

Strona tytułowa/tytuł rozdziału/ nazwa załącznika	Zawartość strony tytułowej/rozdziału/załącznika
1	**2**
Strona tytułowa	– nazwa i adres podmiotu, który wykonał dokumentację – nazwa i adres podmiotu, który zamówił i sfinansował wykonanie dokumentacji – tytuł dokumentacji – imię i nazwisko oraz podpis sporządzającego dokumentację, a także numer kwalifikacji geologicznych albo numer decyzji uznającej kwalifikacje zawodowe w dziedzinie geologii, albo imię i nazwisko oraz podpis osoby świadczącej usługi transgraniczne i napis „osoba świadcząca usługi transgraniczne w dziedzinie geologii” – imiona i nazwiska osób wchodzących w skład zespołu, który sporządził dokumentację oraz ich podpisy – imię, nazwisko i podpis osoby uprawnionej do reprezentowania podmiotu, który sporządził dokumentację – data sporządzenia dokumentacji
CZĘŚĆ OPISOWA DOKUMENTACJI (§ 2 ust. 3 pkt 4, § 19 ust. 1, § 25 ust. 1 rozporządzenia dgi)	
1. Kopia decyzji zatwierdzającej projekt robót geologicznych	– kopia decyzji zatwierdzającej projekt robót geologicznych oraz kopie decyzji zatwierdzające dodatki do projektu robót geologicznych (§ 2 ust. 3 pkt 3 rozporządzenia dgi)
2. Karta informacyjna dokumentacji geologiczno-inżynierskiej	– karta informacyjna dokumentacji geologiczno-inżynierskiej opracowana zgodnie z wzorem z załącznika nr 6 rozporządzenia dgi (§ 2 ust. 4 pkt 6 rozporządzenia dgi) – karta ma zawierać wszystkie elementy zgodne ze wzorem, jeśli jakiś badań nie wykonywano należy wpisać „nie wykonywano”; karta musi być opatrzona podpisem osoby odpowiedzialnej za sporządzenie dokumentacji
3. Kopia dokumentu potwierdzającego istnienie prawa do korzystania z informacji geologicznej	– kopia dokumentu potwierdzającego istnienie prawa do korzystania z informacji geologicznej, którą wykorzystano przy sporządzaniu danej dokumentacji, z uwzględnieniem przepisu art. 205 ust. 3 ustawy pgg (§ 25 ust. 1 pkt 23 rozporządzenia dgi)
4. Wstęp	– informacje dotyczące instytucji wykonującej, zamawiającej, finansującej DGI oraz Inwestorze – podstawa formalnoprawna sporządzenia DGI przez wykonawcę (np.: umowa, z jakiego dnia, jaki przedmiot umowy, strony umowy, opis przedmiotu zamówienia (jeśli dotyczy), przywołane przepisy prawa) – nazwa projektowanej inwestycji (§ 24 ust. 1 pkt 1 rozporządzenia dgi) – podstawa formalnoprawna wykonania robót geologicznych (przywołany przepis prawa, wymienione wszystkie decyzje zatwierdzające projekt robót geologicznych oraz dodatki do projektu z datą wydania i przez kogo wydane) – informacje o etapowości robót geologicznych oraz zmianach wprowadzonych do projektu robót – informacje o zawartości dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (art. 88 ust. 1 ustawy pgg) – informacja, że mapy zostały opracowane na podkładach pozyskanych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego
5. Stopień osiągnięcia zamierzonego celu prac geologicznych	– określenie stopnia osiągnięcia zamierzonego celu prac geologicznych wraz z uzasadnieniem (art. 88 ust. 1 ustawy pgg) – tabelaryczne zestawienie informacji jakie prace i roboty geologiczne zaprojektowano, a jakie zostały faktycznie wykonane – informacja o wszelkich odstępstwach i zmianach dotyczące lokalizacji prac i robót geologicznych, liczby badań, głębokości badań, metod badań, liczby pobranych próbek gruntów, skał, wód, kategorii i klasy jakości próbek gruntów i skał i inne w zależności od potrzeb wraz z uzasadnieniem
6. Lokalizacja i opis zagospodarowania dokumentowanego obszaru	
6.1. Położenie geograficzne i administracyjne dokumentowanego obszaru	– informacje dotyczące lokalizacji inwestycji (§ 25 ust. 1 pkt 1 rozporządzenia dgi) – opis położenia geograficznego i administracyjnego dokumentowanego obszaru, w tym lokalizacji w ramach trójstopniowego podziału terytorialnego państwa (§ 19 ust. 1 pkt 1 rozporządzenia dgi)
6.2. Zagospodarowanie dokumentowanego obszaru	– ogólne informacje o dokumentowanym obszarze dotyczące jego zagospodarowania z uwzględnieniem istniejącej infrastruktury podziemnej (§ 19 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia dgi) – opis użytkowania terenu na obszarze ponad kompleksem składowania oraz w jego otoczeniu, w szczególności (§ 25 ust. 1 pkt 2 lit. a, b, c, d, h rozporządzenia dgi): • rozmieszczenie ludności • odległość od innych emitentów i sieci transportowych dwutlenku węgla • opis istniejących i zlikwidowanych ujęć wód podziemnych i powierzchniowych • opis terenów otaczających kompleks składowania, na które może mieć wpływ podziemne składowanie dwutlenku węgla • opis z podaniem stanu technicznego innych, różnych obiektów, czy otworów badawczych, które mogą stanowić naturalne i antropogeniczne drogi migracji i wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania

Tabela 73 cd.

1	2
6.3. Obiekty i obszary chronione oraz strefy ochronne	– informacje o obiektach i obszarach chronionych występujących na obszarze projektowanej inwestycji i w jego bezpośrednim sąsiedztwie – położenie, w tym odległość od cennych zasobów naturalnych oraz obszarów chronionych, w tym obszarów Natura 2000 i innych form ochrony przyrody, o których mowa w Ustawie z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (§ 25 ust. 1 pkt 2 lit. e rozporządzenia dgi) – informacje o strefach ochronnych występujących na obszarze projektowanej inwestycji – położenie, w tym odległość od stref ochronnych ujęć wody i obszarów ochronnych, zbiorników wód śródlądowych (§ 25 ust. 1 pkt 2 lit. e rozporządzenia dgi)
6.4. Działalność górnicza	– informacje o udokumentowanych złożach kopalin, obszarach i terenach górniczych występujących na obszarze projektowanej inwestycji – przedstawienie lokalizacji złóż kopalin, w szczególności złóż węglowodorów, solanek, wód leczniczych i termalnych, oraz obszarów objętych koncesjami na poszukiwanie, rozpoznawanie i wydobywanie kopalin ze złóż, a także na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji oraz podziemne składowanie odpadów (§ 25 ust. 1 pkt 2 lit. f rozporządzenia dgi) – opis działalności prowadzonej w obrębie i wokół kompleksu składowania, ze szczególnym uwzględnieniem działalności prowadzonej w obszarach górniczych oraz związanej z wykorzystaniem zasobów wód podziemnych, a także opis potencjalnych interakcji z taką działalnością (§ 25 ust. 1 pkt 2 lit. g rozporządzenia dgi) – informacje o historycznej działalności górniczej na obszarze projektowanej inwestycji (jeżeli dotyczy)
7. Informacje dotyczące projektowanej inwestycji	
7.1. Charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych projektowanej inwestycji	– informacje o wymaganiach techniczno-budowlanych projektowanej inwestycji (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) oraz charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych projektowanej inwestycji (§ 25 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia dgi) – ilość dwutlenku węgla przewidziana do podziemnego składowania (§ 25 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia dgi) – informacje o sposobie zatłaczania dwutlenku węgla z uwzględnieniem możliwych zmian zachodzących w górotworze (§ 25 ust. 1 pkt 10 rozporządzenia dgi) – określenie planowanego okresu składowania
7.2. Stopień skomplikowania warunków gruntowych dla części naziemnej projektowanej inwestycji	– informacje o warunkach gruntowych w zależności od stopnia ich skomplikowania (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych
7.3. Kategoria geotechniczna projektowanej inwestycji	– podane przez Projektanta/Projektanta geotechnicznego informacje o kategorii geotechnicznej projektowanej inwestycji (§ 19 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi) w odniesieniu do Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych
8. Wykonane badania i prace geologiczne, w tym roboty geologiczne	– w każdym podrozdziale w zależności od rodzaju badań i prac należy podać: • opis prac i badań, w tym opis badań wykonanych dla projektowanej inwestycji lub etapu jej realizacji ustalonego w projekcie robót geologicznych • wyniki prac i badań, w tym wyniki robót geologicznych, wraz z ich interpretacją (art. 88 ust. 1 ustawy pgg)
8.1. Badania oraz prace i roboty geologiczne wykonane w ramach opracowań archiwalnych	– omówienie wyników przeprowadzonych wcześniej: • robót geologicznych • badań geofizycznych • badań geologicznych • badań geochemicznych • badań środowiskowych • badań geotechnicznych • badań innych na dokumentowanym obszarze wraz z ich interpretacją – powołanie się na wykaz wykorzystanych geologicznych materiałów archiwalnych znajdujących się w spisie – informacja skąd pozyskano materiały archiwalne – informacja o korzystaniu z informacji geologicznej za wynagrodzeniem i/lub bez wynagrodzenia
8.2. Prace geodezyjne	– opis wykonanych prac geodezyjnych – informacja o sposobie wykonania pomiarów geodezyjnych oraz ich dokładności w odniesieniu do rozporządzenia (Rozporządzenie Ministra Rozwoju..., 2020) – informacja o układach odniesienia w jakich podano współrzędne x, y i rzędną H w nawiązaniu do rozporządzenia (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012) – informacja skąd pozyskano podkłady map do opracowania załączników graficznych (§ 2 ust. 6 rozporządzenia dgi)

Tabela 73 cd.

1	2
8.3. Prace kartograficzne	– wyniki geologiczno-inżynierskich prac kartograficznych umożliwiające sporządzenie mapy geologiczno-inżynierskiej – opis obserwacji terenowych przeprowadzonych w rejonie projektowanego obiektu
8.4. Badania geofizyczne	– charakterystyka i zakres (liczba, rodzaj) wykonanych badań geofizycznych oraz wskazanie ich lokalizacji – podanie metodyki wykonania badań geofizycznych lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane badania geofizyczne
8.4.1. (rodzaj badania geofizycznego)	każde badanie geofizyczne opisać w oddzielnym rozdziale
8.5. Prace wiertnicze	– opis i ocena zakresu wykonanych otworów wiertniczych (wyrobisk badawczych) w tym liczba, lokalizacja i rodzaj wykonanych otworów wiertniczych – podanie metodyki wykonania wierceń lub odniesienie do właściwej normy, na podstawie której zostały wykonane wiercenia – informacje na temat techniki wierceń, czy wiercenia były wykonywane z wykorzystaniem płuczki, konstrukcji wierceń w tym średnicy otworów wiertniczych, średnicy rur osłonowych, rodzaju użytych narzędzi wiertniczych, informacji dotyczących zamykania horyzontów wodonośnych, sposób i terminu likwidacji otworów wiertniczych oraz rekultywacji gruntów i inne istotne informacje – opis opróbowania otworów wiertniczych, w tym sposób pobierania próbek gruntów, skał i wód, zakres, liczba i wielkość pobranych próbek w odniesieniu do normy PN-EN ISO 22475-1:2022-04 i PN-EN 1997-2:2009 – zakres przekazania próbek geologicznych podlegających obowiązkowemu przekazaniu państwowej służbie geologicznej, wraz z wykazem zawierającym ilości, wielkości i rodzaj próbek przekazanych do badań powodujących całkowite zniszczenie próbek geologicznych oraz badań geomechanicznych powodujących naruszenie integralności calizny rdzenia wiertniczego i/lub informacja na jakiej podstawie prawnej próbki nie podlegają przekazaniu państwowej służbie geologicznej
8.5.1. Opis i oznaczanie gruntów i skał	– informacja o opisie i oznaczaniu gruntów i skał wraz z odniesiemy do normy PN-EN ISO 14688-1:2018-05 – informacja o opisie rdzenia wiertniczego wraz z odniesieniem do normy PN-EN ISO 14689: 2018-05
8.5.2. Obserwacje poziomów wód podziemnych	– podanie metodyki wykonania obserwacji poziomów wód podziemnych i odniesienie do dokumentu (np. norma, procedura, pozycja literatury), w oparciu o który zostały wykonane obserwacje poziomów wód podziemnych – ustalenie głębokości położenia zwierciadeł wód podziemnych, zwłaszcza w obszarze projektowanego projektowanego kompleksu składowania
8.6. Sondowania	– dla każdego wykonanego rodzaju sondowania sporządzić podrozdział, w którym należy podać: • opis i ocenę zakresu wykonanych sondowań, w tym liczbę, lokalizację oraz rodzaj wykonanych sondowań • odniesienie do właściwej normy, w oparciu o którą zostały wykonane sondowania lub jeśli nie ma normy opisać metodykę wykonania sondowań • wartości mierzone podczas sondowań • stosowane korelacje do interpretowania wyników sondowań, zwłaszcza współczynniki empiryczne w podziale na wydzielone warstwy gruntów i skał wraz z uzasadnieniem • wartości wyprowadzone, uzyskane z sondowań
8.6.1. (rodzaj sondowania)	– każde sondowanie opisać w oddzielnym rozdziale
8.7. Badania geochemiczne	– charakterystyka i ocena zakresu (liczba, rodzaj) wykonanych badań geochemicznych oraz wskazanie lokalizacji ich wykonania lub miejsc pobrania próbek, zwłaszcza próbek wód podziemnych – opisane metodyki wykonania badań geochemicznych lub odniesienie do właściwej, normy/procedury w oparciu o którą zostały wykonane badania geochemiczne – ocena wpływu agresywności wód podziemnych na materiały konstrukcyjne, które zostaną użyte do wykonania projektowanego obiektu budowlanego (jeśli możliwe). Podać uzasadnienie, dlaczego nie oceniono wpływu agresywności wód podziemnych na materiały konstrukcyjne, które zostaną użyte do wykonania projektowanej inwestycji (jeśli dotyczy) – jeśli badania nie były wykonywane, rozdział należy zostawić i zapisać, że badań geochemicznych nie wykonywano
8.8. Badania laboratoryjne próbek gruntów, skał	– dla każdego wykonanego rodzaju badania laboratoryjnego należy sporządzić podrozdział, w którym należy podać: • opis i ocenę zakresu wykonanych badań laboratoryjnych • informację o kategorii i klasie jakości próbek gruntów i skał wymaganych do badań laboratoryjnych • odniesienie do właściwej normy, w oparciu o którą zostały wykonane badania laboratoryjne lub jeśli nie ma normy opisać metodykę wykonania badań • wartości mierzone podczas badań laboratoryjnych • wartości wyprowadzone uzyskane z badań laboratoryjnych

Tabela 73 cd.

1	2
cd. 8.8. Badania laboratoryjne próbek gruntów, skał	• stosowane korelacje do interpretowania wyników badań laboratoryjnych, zwłaszcza nomogramy, współczynniki empiryczne w podziale na wydzielone warstwy gruntów i skał wraz z uzasadnieniem • stosowane klasyfikacje w zależności od badanej cechy/parametru gruntu, skały, np. norma PN-EN ISO 14688-2:2018-05
8.8.1. Opis i oznaczanie gruntów i skał	– określić sposób opisu i oznaczania gruntów i skał
8.8.2. Klasyfikowanie gruntów i skał	– określić sposób klasyfikowania gruntów i skał
8.8.3. Badania akustyczne	– opisać zakres i metodykę wykonanych badań akustycznych
8.8.4. (kolejny rodzaj bad. laboratoryjnego)	każde badanie opisać w oddzielnym rozdziale
9. Opis środowiska geologicznego	
9.1. Geomorfologia	– opis sytuacji geomorfologicznej wraz z informacją o jednostkach i formach geomorfologicznych występujących na obszarze wykonanych robót geologicznych – charakterystyka spadków terenu
9.2. Warunki hydrologiczne	– opis hydrografii wraz z informacją na terenie jakich zlewni występuje obszar wykonanych robót geologicznych
9.3. Budowa geologiczna	– opis budowy geologicznej kompleksu podziemnego, nadkładu, otaczającej przestrzeni (w tym obszarów połączonych hydraulicznie) (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg), z uwzględnieniem: • tektoniki, krasu, litologii i genezy warstw (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) • warstw izolujących – ich miąższości i rozprzestrzenienia (§ 25 ust. 1 pkt 5 rozporządzenia dgi) • warunków izolacyjnych naturalnej bariery geologicznej (§ 25 ust. 1 pkt 5 rozporządzenia dgi) • oceny geochemicznej – określenie współczynników rozpuszczalności i mineralizacji (§ 25 ust. 1 pkt 5 rozporządzenia dgi) – opis przestrzennego rozpoznania budowy geologicznej kompleksu składowania wynikającego z danych otrzymanych z metod geofizycznych i innych metod badawczych, w tym profilowania rdzeni wiertniczych (§ 25 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi)
9.3.1. Procesy i zjawiska geologiczne, geologiczno-inżynierskie i geodynamiczne	– przedstawienie i opis występujących w określonej przestrzeni i w jej sąsiedztwie zjawisk i procesów geologicznych, geologiczno-inżynierskich i geodynamicznych w szczególności wietrzenia, deformacji filtracyjnych, pełzania, pęcznienia, osiadania zapadowego i innych (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) oraz ocenę wielkości wpływu tych procesów na realizację tego obiektu – opis procesów krasowych i sufozyjnych oraz zjawisk erozji wgłębnej i denudacji w rejonie kompleksu składowania (§ 25 ust. 1 pkt 8 rozporządzenia dgi) – ocena możliwości występowania wstrząsów sejsmicznych naturalnych i wzbudzonych działalnością człowieka w górotworze, w którym ma być zlokalizowana projektowana inwestycja, z uwzględnieniem oceny aktywności sejsmicznej naturalnej i wzbudzonej działalnością człowieka i jej wpływ na właściwości izolacyjne oraz stateczność górotworu (§ 25 ust. 1 pkt 11 rozporządzenia dgi) – charakterystyka i ocena stabilności górotworu otaczającego kompleks składowania z uwzględnieniem możliwości wykonania uszczelnienia (§ 25 ust. 1 pkt 12 rozporządzenia dgi) – ocena aktywności tektonicznej oraz analiza danych o przebiegu stref uskokowych, w tym z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych (§ 25 ust. 1 pkt 13 rozporządzenia dgi)
9.3.2. Procesy i przekształcenia antropogeniczne	– przedstawienie i opis występujących w określonej przestrzeni i w jej sąsiedztwie przekształceń i procesów antropogenicznych (§ 19 ust. 1 pkt 4 rozporządzenia dgi) z oceną wielkości ich wpływu na projektowany obiekt budowlany
9.4. Warunki hydrogeologiczne	– opis warunków hydrogeologicznych górotworu, w którym przewiduje się składowanie dwutlenku węgla oraz skał i gruntów ograniczających przeznaczoną do inwestycji część górotworu (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 6 rozporządzenia dgi), w tym: • charakterystyka użytkowych poziomów wodonośnych (§ 25 ust. 1 pkt 5 rozporządzenia dgi) • określenie parametrów hydrogeologicznych górotworu i warstw izolujących, w tym porowatość i przepuszczalność • określenie szczelności nadkładu • informacja o Głównych Zbiornikach Wód Podziemnych występujących na obszarze wykonanych robót geologicznych • informacja o ujęciach wód podziemnych • informacja o występowaniu i hydrodynamice wód podziemnych
10. Charakterystyka wydzielonych zespołów gruntów i skał	– charakterystyka wydzielonych zespołów gruntów i skał, w tym serii litologiczno-genetycznych – w charakterystyce serii litologiczno-genetycznych należy ująć: • wiek geologiczny (stratygrafię) • środowisko depozycji (genezę) • wykształcenie litologiczne (litologię) • wiodący/e parametr/y fizyczno-mechaniczny/e, który/e zastosowano do wydzielenie serii litologiczno-genetycznych • inne w zależności od potrzeb

Tabela 73 cd.

1	2
11. Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów i skał	– wykaz właściwości fizyczno-mechanicznych określonych dla serii litologiczno-genetycznych w podziale na: • właściwości chemiczne • właściwości fizyczne, zwłaszcza przepuszczalność, porowatość i szczelinowatość • właściwości wytrzymałościowe • właściwości odkształceniowe • właściwości akustyczne • inne w zależności od potrzeb – opis i ocena właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał tworzących zespoły gruntów i skał, w tym serii litologiczno-genetycznych (§ 19 ust. 1 pkt 5) z uwzględnieniem ww. podziału właściwości fizyczno-mechanicznych – tabelaryczne zestawienie właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał w podziale na wydzielone serie litologiczno-genetyczne z uwzględnieniem ww. podziału właściwości fizyczno-mechanicznych – tabelaryczne zestawienie właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów i skał powinno zawierać następujące informacje dla każdej wydzielonej serii litologiczno-genetycznej: • liczba oznaczeń • minimum • maksimum • średnia • moda • mediana • odchylenie standardowe
12. Warunki geologiczno-inżynierskie oraz prognoza wpływu projektowanej inwestycji na środowisko gruntowo-wodne	– opis i ocena warunków geologiczno-inżynierskich kompleksu składowania (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi), w tym: • geologiczno-inżynierska charakterystyka porowatości i szczelności w tym ciśnienia szczelinowania i przepuszczalności hydraulicznej, z uwzględnieniem danych z sąsiednich struktur geologicznych o podobnych właściwościach zbiornikowych (§ 25 ust. 1 pkt 6 rozporządzenia dgi) • charakterystyka wytrzymałości skały uzyskanej na podstawie badań lub materiałów archiwalnych (§ 25 ust. 1 pkt 6 rozporządzenia dgi) – charakterystykę geologiczno-inżynierską projektowanej inwestycji z podziałem na (§ 25 ust. 1 pkt 9 rozporządzenia dgi): • część naziemną • otwory wiertnicze z opisem ich konstrukcji i oceną ich stanu technicznego • część podziemną, z oceną chłonności i szczelności górotworu w otoczeniu podziemnego składowiska dwutlenku węgla – opis i ocena warunków geologiczno-inżynierskich części naziemnej wraz z prognozą wpływu projektowanej inwestycji na środowisko gruntowo-wodne (art. 91 ust. 2 pkt 1 ustawy pgg, § 19 ust. 1 pkt 7 rozporządzenia dgi), należy wykonać w przypadku, gdy dokumentacja, poza rozpoznawaniem geologiczno-inżynierskim części podziemnej zawiera rozpoznanie podłoża gruntowo-wodnego na powierzchni terenu, w związku z posadowieniem obiektów budowlanych, jeżeli nie jest opracowywana na te potrzeby osobna dokumentacja (art. 91 ust. 1 pkt 2 ustawy pgg) i powinna ujmować: • warunki geomorfologiczne • warunki hydrogeologiczne • warunki geologiczne z uwzględnieniem właściwości fizyczno-mechanicznych wydzielonych serii litologiczno-genetycznych • procesy i zjawiska geologiczne, geologiczno-inżynierskie i geodynamiczne • procesy i przekształcenia antropogeniczne • inne w zależności od potrzeb
13. Modelowanie numeryczne	
13.1. Model statyczny	– opis trójwymiarowego statycznego geologicznego modelu górotworu z wykorzystaniem komputerowych symulatorów wraz z oceną niepewności dla poszczególnych parametrów i scenariuszy (§ 25 ust. 1 pkt 15 rozporządzenia dgi)
13.2. Model dynamiczny	– opis modelowania dynamicznego – symulacje zatłaczania dwutlenku węgla dla składowiska z wykorzystaniem trójwymiarowego statycznego modelu górotworu (§ 25 ust. 1 pkt 16 rozporządzenia dgi) – charakterystykę dynamicznego zachowania się dwutlenku węgla podczas składowania (na podstawie wyników modelowania dynamicznego, w perspektywie dziesiątek i tysięcy lat (§ 25 ust. 1 pkt 17 rozporządzenia dgi) – analiza wyników modelowania dynamicznego w zakresie przewidywanych procesów zachodzących w górotworze i związanych z tym ryzyk (§ 25 ust. 1 pkt 18 rozporządzenia dgi) – opis przeprowadzonych wielokrotnych symulacji na potrzeby oceny wrażliwości na zmienność przyjętych do analizy parametrów modelowania dynamicznego (§ 25 ust. 1 pkt 19 rozporządzenia dgi)

Tabela 73 cd.

1	2
14. Przydatność badanego obszaru do podziemnego składowania dwutlenku węgla	– przydatność badanego obszaru do realizacji zamierzonych przedsięwzięć (art. 91 ust. 2 pkt 2 ustawy pgg)
15. Ocena możliwości wykonania projektowanej inwestycji	– ocena możliwości wykonania projektowanej inwestycji z charakterystyką zagrożeń na etapie jej budowy, eksploatacji i likwidacji oraz w przypadku awarii (§ 25 ust. 1 pkt 3 rozporządzenia dgi)
16. Prognoza zmian w środowisku oraz ocena zagrożeń dla środowiska	– ocena stanu środowiska, w tym warunków gruntowo-wodnych – ocena wpływu podziemnego składowania dwutlenku węgla, w przypadku rozszczelnienia, na właściwości formacji geologicznej tworzącej kompleks składowania oraz nadkładu, a także na jakość wód podziemnych (§ 25 ust. 1 pkt 14 rozporządzenia dgi) – wskazania i zalecenia dotyczące konieczności wprowadzenia rozwiązań w celu zminimalizowania wpływu podziemnego składowania dwutlenku węgla na środowisko wraz z propozycjami zabezpieczeń na etapie likwidacji i po zamknięciu podziemnego składowiska dwutlenku węgla (§ 25 ust. 1 pkt 21 rozporządzenia dgi) – prognoza wpływu i przewidywanych zmian w środowisku (w tym warunków gruntowo-wodnych), które mogą powstać na skutek realizacji, funkcjonowania oraz likwidacji zamierzonych przedsięwzięć – jeżeli nie istnieje obowiązek sporządzenia raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko zgodnie z odrębnymi przepisami (art. 91 ust. 2 pkt 3 ustawy pgg, § 24 ust. 1 pkt. 16 rozporządzenia dgi) – jeśli nie była wymagana prognoza, powołać się i odnieść do raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, wskazując kiedy został opracowany raport, kto go opracował oraz główne jego założenia (art. 91 ust. 2 pkt 3 ustawy pgg) – określenie zasięgu proponowanego obszaru oraz terenu górniczego
17. Charakterystyka i ocena ryzyka	– charakterystyka ryzyka obejmująca (§ 25 ust. 1 pkt 20 lit. d rozporządzenia dgi): • ocenę bezpieczeństwa i stabilności podziemnego składowiska dwutlenku węgla w krótkim i długim okresie, w tym ocenę ryzyka wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, dla przyjętych warunków składowania, a także wpływ na środowisko oraz życie i zdrowie ludzi przy uwzględnieniu najgorszego scenariusza, przy czym opis ryzyka przygotowuje się na podstawie charakterystyki zagrożeń, oceny narażenia i oceny skutków • ocenę źródeł niepewności określonych na etapach charakterystyki i oceny podziemnego składowiska dwutlenku węgla w fazie projektowania składowiska oraz, o ile jest to wykonalne, opis możliwości zmniejszenia niepewności – ocena ryzyka obejmująca (§ 25 ust. 1 pkt 20 rozporządzenia dgi): • charakterystykę zagrożeń, opracowaną przez określenie możliwości wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, ustalonych na podstawie modelowania dynamicznego i oceny bezpieczeństwa • ocenę narażenia opracowaną na podstawie charakterystyki środowiska, rozmieszczenia i działalności ludności na obszarze ponad kompleksem składowania, a także z uwzględnieniem potencjalnego wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania drogami określonymi w ramach charakterystyki zagrożeń • ocenę skutków opracowaną na podstawie wrażliwości poszczególnych gatunków, zbiorowisk lub siedlisk w powiązaniu z potencjalnym wydostaniem się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, określonymi w ramach charakterystyki zagrożeń, która powinna obejmować odpowiednio wpływ narażenia na podwyższone stężenia dwutlenku węgla w biosferze, w tym w glebie, osadach morskich i wodach przydennych, narażonych na niedotlenienie i nadmiar dwutlenku węgla w organizmach, a także obniżenie pH w tych środowiskach w wyniku wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, jak również ocenę wpływu innych substancji, które mogą występować podczas wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania: zanieczyszczeń spowodowanych zatłaczaniem dwutlenku węgla lub substancji powstałych w wyniku jego składowania, przy czym skutki te ocenia się w różnych skalach czasowych i przestrzennych oraz łączy się z różnymi wielkościami wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania
18. Zalecenia dotyczące prowadzenia monitoringu	– zalecenia dla podmiotu, który zamówił dokumentację, dotyczące prowadzenia monitoringu projektowanej inwestycji na etapie przed jej eksploatacją, eksploatacji oraz wstępne zalecenia dotyczące zamknięcia składowiska, w tym zalecenia po przekazaniu odpowiedzialności Krajowemu Administratorowi Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (§ 25 ust. 1 pkt. 22 rozporządzenia dgi)
19. Złoża kopalin przydatne do realizacji projektowanej inwestycji	– informacje o lokalizacji i zasobach złóż kopalin, które mogą być wykorzystane przy wykonywaniu projektowanej inwestycji, oraz ich jakości (§ 19 ust. 1 pkt 8 rozporządzenia dgi) (jeśli dotyczy). Podać uzasadnienie, dlaczego nie podano informacji o lokalizacji i zasobach złóż kopalin, które mogą być wykorzystane przy wykonywaniu projektowanej inwestycji, oraz ich jakości
20. Podsumowanie	– krótkie podsumowanie w nawiązaniu do każdego rozdziału – wskazanie wymagań rozporządzenia DGI, które nie mają zastosowania, zwłaszcza w zakresie załączników graficznych

Tabela 73 cd.

1	2
21. Spis literatury i materiałów archiwalnych	– spis literatury i materiałów archiwalnych wykorzystanych przy sporządzeniu dokumentacji (§ 2. ust. 3 pkt 5 rozporządzenia dgi), w podziale na: • wykaz aktów prawnych • wykaz norm • wykaz instrukcji, wytycznych, zasad, poradników • wykaz wykorzystanej literatury • wykaz wykorzystanych geologicznych materiałów archiwalnych • wykaz stron internetowych
CZĘŚĆ GRAFICZNA	do dokumentacji należy dołączyć załączniki podane poniżej (§ 2 ust. 1 rozporządzenia dgi; § 25 ust. 2 rozporządzenia dgi)
Załącznik 1. Mapa przeglądowa z lokalizacją obszaru badań	– mapa z lokalizacją kompleksu składowania (§ 2 ust. 6 rozporządzenia dgi, § 19 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia dgi)
Załącznik 2. Mapa dokumentacyjna	– mapa topograficzna z naniesionymi lokalizacją kompleksu składowania, w tym nadkładu oraz otaczającej przestrzeni, podziemnego składowiska dwutlenku węgla, odwiertów iniekcyjnych, otworów obserwacyjnych, punktów badawczych i innych punktów pomiarowych monitoringu kompleksu składowania, a także innych istniejących i zlikwidowanych otworów wiertniczych, wyrobisk górniczych i obiektów, które mogą stanowić naturalne i antropogeniczne drogi migracji i wydostania się dwutlenku węgla poza kompleks składowania, ujęciami wód podziemnych, zbiornikami wód powierzchniowych, granicami obszarów i terenów górniczych, granicami złóż kopalin i obszarów koncesyjnych, punktami sieci monitoringu wód, granicami stref ochronnych ujęć wód podziemnych, granicami zbiorników wód podziemnych i ich obszarów ochronnych – jeżeli zostały wyznaczone, położeniem obszarów chronionych, w tym obszarów Natura 2000, a także proponowanymi granicami obszaru i terenu górniczego dla podziemnego składowania dwutlenku węgla (§ 25 ust. 2 pkt. 1 rozporządzenia dgi) – mapa z naniesioną lokalizacją: dokumentowanego obszaru, linii przekrojów geofizycznych (jeśli wykonywane), linii przekrojów geologiczno-inżynierskich, miejsc punktów dokumentacyjnych (§ 19 ust. 2 pkt 2 rozporządzenia dgi)
Załącznik 3. Mapa sejsmiczności	– mapa sejsmiczności przedstawiająca aktywność sejsmiczną obszaru inwestycji (§ 25 ust. 2 pkt. 2 rozporządzenia dgi)
Załącznik 4. Mapa strukturalna lub tektoniczna obszaru kompleksu składowania	– mapa przedstawiająca, w zależności od obszaru badań, np.: • granice struktur geologicznych • strop, spąg formacji geologicznej służącej za kompleks składujący • liniowe przedstawienie form tektonicznych: uskoków, dyslokacji, nasunięć, rowów • informacje dotyczące warstwowań i foliacji najczęściej mapa ma formę mapy ścięciowej, tj. horyzontu stropu górotworu przeznaczonego do podziemnego składowania dwutlenku węgla (§ 25 ust. 2 pkt. 3 rozporządzenia dgi)
Załącznik 5. Mapa hydrogeologiczna	na mapie należy przedstawić użytkowe poziomy wodonośne, głębokość ich występowania oraz miąższość (§ 25 ust. 2 pkt. 4 rozporządzenia dgi)
Załącznik 6. Mapa geologiczno-inżynierska	– mapa geologiczno-inżynierska (§ 19 ust. 2 pkt 3 rozporządzenia dgi) obejmuje obszar badań i jego sąsiedztwo – w przypadku części naziemnej, przedstawia cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na posadowienie obiektów budowlanych na powierzchni. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie, należy wziąć pod uwagę geomorfologię, budowę geologiczną, w tym tektonikę, sposobu i charakteru wykształcenia gruntów i skał, ich cechy fizyczno-mechaniczne, występowanie i charakter wód podziemnych oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne (Jakubicz, Łozińska, 1988 zmienione) – w przypadku części podziemnej, przedstawia cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na zagospodarowanie przestrzeni podziemnej (strefy górotworu) przeznaczonej na obiekt podziemny. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie dla części podziemnej, należy wziąć pod uwagę budowę geologiczną, w tym czynniki strukturalne i geodynamiczne, warunki hydrogeologiczne oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne występujące lub mogące wystąpić w górotworze
Załącznik 7. Mapy tematyczne [podać nazwę mapy]	– mapy tematyczne przedstawiające istotne cechy, parametry górotworu, w którym przewiduje się wybudować obiekt podziemny, np.: • mapa porowatości • mapa przepuszczalności • mapa miąższości kolektora mapy obrazujące rozmieszczenie danego parametru najlepiej przedstawiać w postaci izoliniowej
Załącznik 8. Przekroje geofizyczne	– przekroje geofizyczne w podziale na rodzaj badania geofizycznego (§ 25 ust. 2 pkt 5 rozporządzenia dgi)
Załącznik 9. Przekroje geologiczno-inżynierskie	– przekroje geologiczno-inżynierskie z naniesionymi wykresami sondowań statycznych i dynamicznych (jeśli były wykonywane) (§ 19 ust. 2 pkt 5 rozporządzenia dgi) i innych sondowań

Tabela 73 cd.

1	2
Załącznik 10. Profil geologiczny kompleksu składowania	– profil geologiczny kompleksu składowania z charakterystyką geologiczno-inżynierską warstw (§ 25 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi)
Załącznik 11. Tabelaryczne zestawienie wyników badań	– tabelaryczne zestawienie wyników badań laboratoryjnych i terenowych (§ 19 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia dgi)
Załącznik 12. Profile otworów wiertniczych	– profile otworów wiertniczych, w jednej skali, wraz z określeniem ich rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012) – dokumentacja fotograficzna rdzeni i pobranych próbek gruntów i skał
Załącznik 13. Plany wyrobisk (jeżeli wykonywano)	– plany wyrobisk zawierające odwzorowania ich ścian, w jednej skali, wraz z określeniem ich rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012)
Załącznik 14. Karty sondowań	– karty sondowań wraz z ich wykresami i interpretacją, opracowane w jednej skali, wraz z określeniem rzędnych H (§ 19 ust. 2 pkt 4, § 19 ust. 2 pkt 6 rozporządzenia dgi) i współrzędnych x, y w układzie odniesienia zgodnym z rozporządzeniem (Rozporządzenie Rady Ministrów..., 2012)
Załącznik 15. Karty badań laboratoryjnych	– karty badań laboratoryjnych lub/i raporty z badań laboratoryjnych z wykresami uzyskanymi z badań uziarnienia, wytrzymałościowych i odkształceniowych (§ 19 ust. 2 pkt 4 rozporządzenia dgi) oraz wszystkich innych badań wraz z interpretacją w podziale na każdy rodzaj wykonanego badania laboratoryjnego
Załącznik...	– w zależności od potrzeb kolejne załączniki zawierające np. decyzje środowiskowe, specjalne zgody i inne

Załączniki będące integralną częścią dokumentacji geologiczno-inżynierskiej powinny zawierać m.in. następujące informacje: imię i nazwisko osób opracowujących i sprawdzających załącznik, daty wykonania badań, imiona i nazwiska osób wykonujących badania.

Mapy, załączane do dokumentacji, w zależności od wymagań, rodzaju, potrzeb i skali, należy sporządzać na podkładzie map topograficznych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub na mapie sytuacyjno-wysokościowej sporządzonej na podstawie danych i informacji uzyskanych z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego lub innych podkładach w zależności od wymagań szczególnych wynikających z przepisów prawa. Mapy należy opracować w obowiązującym układzie współrzędnych zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych.

Wszystkie mapy dołączane do dokumentacji muszą mieć:
- elementy kartograficzne: symbol wskazujący północ, siatkę kartograficzną z opisem współrzędnych lub 4 krzyże opisujące współrzędne, skalę i podziałkę metryczną,
- ramkę zawierającą: numer załącznika (unikatowy identyfikator), tytuł załącznika (tytuł mapy), nazwę Inwestora, nazwę Projektanta (jeżeli wyłoniony), nazwę Wykonawcy, nazwę inwestycji, imię i nazwisko osoby wykonującej i sprawdzającej załącznik, nazwę układu współrzędnych, skalę mapy,
- objaśnienia zawierające elementy przedstawione na mapie,
- skorowidz arkuszy map przedstawionych na kolejnych załącznikach.

Na mapach należy przedstawić informacje/dane istotne z uwagi na specyfikę obszaru badań lub treść mapy.

8. GROMADZENIE DANYCH GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Dane geologiczno-inżynierskie są zbierane podczas całego procesu dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (patrz: cz. II, rozdz. 2 – rys. 57). Ich gromadzenie obejmuje pozyskanie, przechowanie i ewentualną aktualizację możliwie pełnej informacji dotyczącej przestrzeni podziemnej oraz powierzchni terenu w granicach obszaru inwestycji i polega m.in. na:

– zebraniu wszelkich danych o inwestycji;
– pozyskiwaniu informacji geologicznych i innych danych związanych z inwestycją;
– przechowywaniu zgromadzonych danych i informacji w określonym miejscu i formacie, np.: w postaci cyfrowej (baza danych, dokument elektroniczny itp.) na określonym serwerze lub w archiwum, w formie papierowej (wraz z kopią cyfrową na nośniku informatycznym);
– kompletowaniu i aktualizowaniu danych geologiczno-inżynierskich w miarę ich przybywania.

Dane geologiczno-inżynierskie stanowią zbiór danych wykorzystywanych w procesie dokumentowania geologiczno-inżynierskiego i obejmują m.in.:

– dane geologiczne, zgodne z definicją podaną w ustawie pgg (dalej wyniki badań);
– dane archiwalne, dostępne w archiwach instytucji państwowych, samorządowych i przedsiębiorstw;
– dane zgromadzone w bazach danych, udostępniane przez portale internetowe lub na wniosek.

Poza gromadzeniem danych powstających w wyniku badań geologiczno-inżynierskich, niezwykle ważne w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim jest zebranie materiałów archiwalnych i ich ocena pod kątem wiarygodności (patrz: cz. II, rozdz. 2.1). Z punktu widzenia wymogów dokumentacji, biorąc pod uwagę rodzaj planowanej działalności (składowanie/magazynowanie) oraz rodzaj podziemnego obiektu, pozyskanie i analiza materiałów archiwalnych oraz danych istotnych dla inwestycji jest niezbędne do określenia rodzaju, metodyki i zakresu badań.

Sposób zbierania, składowania oraz aktualizowania danych geologiczno-inżynierskich powinien być szczegółowo określony na początku procesu inwestycyjnego. Zapewnia to sprawność procesu gromadzenia informacji, a jednocześnie pozwala właściwie zdefiniować odpowiedni do nich dostęp wszystkim zainteresowanym.

Gromadzenie danych geologiczno-inżynierskich powstających podczas procesu dokumentowania zapewnienia stały dostęp do wszystkich wyników badań oraz danych i informacji o środowisku w obrębie i w sąsiedztwie inwestycji, który jest zapewniony nie tylko w trakcie trwania procesu inwestycyjnego, lecz także po jego zakończeniu.

Podczas procesu dokumentowania wszystkie efekty prac powinny być zebrane i przechowywane w postaci cyfrowej, jako dokumenty elektroniczne oraz w formie cyfrowych baz danych (dane wektorowe i rastrowe). Dobrą praktyką jest tworzenie kopii zapasowych tych danych na niezależnych dyskach lub serwerach lub/i na informatycznych nośnikach danych w celu ich zabezpieczenia i archiwizacji.

8.1. DANE GEOLOGICZNE OTWOROWE

Profile otworów wiertniczych dostarczają podstawowej wiedzy na temat budowy geologicznej górotworu. Jest to tym bardziej istotne, że dane są zdobywane bezpośrednio podczas wiercenia. Pozyskanie i zgromadzenie ich pozwala na prawidłowe zaplanowanie prac badawczych, zwiększa efektywność interpretacji, a tym samym umożliwia zbudowanie takiego modelu, który będzie najbliższy rzeczywistej budowie geologicznej.

Rozpoznanie wgłębne w Polsce było związane głównie z poszukiwaniami złóż lub projektami badawczymi (naukowymi). Dane z wierceń przekazywano do Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB), stąd największy zbiór wgłębnych danych otworowych w Polsce znajduje się w Narodowym Archiwum Geologicznym (NAG) w PIG-PIB. Rdzenie pozyskane podczas prac wiertniczych są przechowywane jako własność Skarbu Państwa w magazynach rdzeni NAG, co z punktu widzenia rodzaju projektowanego przedsięwzięcia pozwala na ewentualną weryfikację informacji zawartych w kartach otworowych oraz przeprowadzenie dodatkowych badań, uszczegóławiających informacje o górotworze.

W związku z powyższym głównym źródłem archiwalnych danych otworowych jest NAG. Przede wszystkim są to archiwalia analogowe, papierowe, w postaci dokumentacji geologicznych, dokumentacji otworowych lub osobnych kart otworów. Należy dodać, że informacje o położeniu otworów oraz ich profile są sukcesywnie wprowadzane do Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG), dzięki czemu dostęp do potrzebnych informacji jest szybszy i łatwiejszy.

Jednak należy wziąć pod uwagę, że nie wszystkie informacje o wykonanych otworach mogły trafić do PIG-PIB. Regulacje prawne w tym zakresie były wielokrotnie zmieniane, stąd niewątpliwie należy, o ile to możliwe, sięgnąć do

archiwów urzędów, przedsiębiorstw i instytucji, które takie dane mogą mieć. Należą do nich m.in.: Starostwa Powiatowe, Urzędy Marszałkowskie, PGNiG, Wyższy Urząd Górniczy i Okręgowe Urzędy Górnicze, a nawet kopalnie prowadzące działalność na terenie planowanej inwestycji polegającej na budowie podziemnego obiektu.

Dobrym źródłem informacji są ponadto bazy danych, gromadzące informacje zgodnie w środowisku GIS. Cenna pod tym względem jest Baza Danych Geomechanicznych (BDG) prowadzona w Zakładzie Geomechaniki Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego – przechowuje dane pochodzące z ośrodków skalnych, zlokalizowanych jednoznacznie w przestrzeni przyrodniczej, zatem każdemu obiektowi można przypisać określone położenie w przestrzeni – x, y i H (Pinińska, Dziedzic, 2004; Pinińska i in., 2005).

Archiwalne profile otworów wiertniczych, archiwalne dane parametryczne oraz otworowe dane z wierceń wykonane na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej należy wprowadzać do odpowiednio skonstruowanej bazy danych (patrz: cz. II, rozdz. 9.1), co pozwoli na ich późniejszą interpretację, przeprowadzenie niezbędnych analiz i zbudowanie prawidłowego modelu geologicznego.

8.2. DANE ANALOGOWE NIEOTWOROWE

Oprócz danych otworowych, niewątpliwie przydatne będą inne informacje dotyczące górotworu, w którym planuje się budowę podziemnego obiektu. Należą do nich m.in. różnego rodzaju mapy, raporty z badań (geofizycznych, geochemicznych, fizyczno-mechanicznych, hydrogeologicznych itp.), zestawienia statystyczne i tabelaryczne oraz pozycje książkowe i artykuły naukowe. Wiele z nich powstało na podstawie interpretacji i analiz danych pozyskanych z otworów wiertniczych, często w trakcie lub zaraz po ich wykonaniu przez przedsiębiorstwa lub firmy, które prowadziły lub zlecały prace wiertnicze. Znaczną ich część wraz z danymi otworowymi przekazywano do PIG-PIB, gdzie często podlegały reinterpretacji i czasami adaptacji, niejednokrotnie służąc jako dane do opracowania syntetycznych, regionalnych map wgłębnych w różnych skalach (Papiernik, 2014).

Dlatego głównym źródłem danych archiwalnych, innych niż dane otworowe, jest NAG. Głównie są to materiały archiwalne analogowe – papierowe, w postaci dokumentacji geologicznych lub różnego rodzaju opracowań kartograficznych.

O ile to możliwe należy również sięgnąć do archiwów urzędów, przedsiębiorstw i instytucji, które takie dane mogą mieć (tab. 74). Tak jak w przypadku danych otworowych, należą do nich m.in.: Starostwa Powiatowe, Urzędy Marszałkowskie, PGNiG, Wyższy Urząd Górniczy i Okręgowe Urzędy Górnicze, kopalnie, ale także uczelnie wyższe i archiwa przedsiębiorstw geofizycznych i/lub geologicznych.

Część analogowych nieotworowych danych archiwalnych, szczególnie opracowania kartograficzne, może mieć już postać cyfrową. Jednak znaczna większość z nich będzie dostępna jedynie w formie analogowych, papierowych dokumentacji i obrazów kartograficznych (map), co najwyżej mogą to być ich odpowiedniki w postaci zdjęć i skanów (PDF, TIF, JPG itp.). Wybrane informacje, przydatne z punktu widzenia prowadzonej inwestycji, należy przetworzyć do cyfrowej, wektorowej postaci (zdigitalizować/zwektoryzować).

Zwektoryzowane warstwy przestrzenne należy zaadaptować w taki sposób, żeby uzupełnić przestrzenną bazę danych GIS (patrz: cz. II, rozdz. 9.1) przeznaczoną do gromadzenia, przetwarzania i interpretacji danych przestrzennych, istotnych dla zaprojektowania obiektu podziemnego oraz infrastruktury naziemnej. Jest to niezwykle istotne, gdyż umożliwi przeprowadzenie niezbędnych analiz geostatystycznych, koniecznych dla prawidłowej oceny górotworu przeznaczonego na obiekt podziemny.

Tabela 74

Przykład analogowych, nieotworowych danych związanych z obszarem inwestycji

Lp.	Rodzaj danych	Dysponent/właściciel
1	Kategoria terenu górniczego	WUG; kopalnia*
2	Stwierdzone osiadania powierzchni terenu	WUG; kopalnia*
3	Stwierdzone wypiętrzenia powierzchni terenu	WUG; kopalnia*
4	Prognozowane osiadania powierzchni terenu	WUG; kopalnia*
5	Prognozowane wypiętrzenia powierzchni terenu	WUG; kopalnia*
6	Powierzchniowe ruchy masowe ziemi	Starostwo Powiatowe
7	Tereny zagrożone ruchami masowymi ziemi	Starostwo Powiatowe
8	Obszary potencjalnie historycznych zanieczyszczeń powierzchni ziemi	Starostwo Powiatowe
9	Teren ochrony pośredniej/bezpośredniej ujęcia wód podziemnych	Urząd Marszałkowski
10	Profile geofizyczne: konduktometryczne, sejsmiczne, grawimetryczne, magnetometryczne itp.	przedsiębiorstwa geofizyczne, geologiczne

* jeżeli danych nie posiada/nie udostępnia Wyższy Urząd Górniczy (WUG), po dane należy zgłosić się do zarządu kopalni, której teren górniczy znajduje się w zasięgu/w obrębie planowanej inwestycji

8.3. DANE CYFROWE NIEOTWOROWE

Oprócz informacji związanych ściśle z górotworem, w którym jest projektowany obiekt podziemny, na potrzeby wykonania dokumentacji istotne są także inne dane, niezbędne do przeprowadzenia analiz i dokonania wizualizacji na mapach (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) m.in. zasięgu i położenia obszarów chronionych oraz różnego rodzaju zagrożeń geologicznych.

Są to zazwyczaj ogólnodostępne dane przestrzenne, zarówno wektorowe, jak i rastrowe, wytworzone i publikowane na portalach internetowych. Dysponentami i właścicielami danych są zazwyczaj instytucje je wytwarzające, finansujące, a nierzadko gromadzące, archiwizujące i udostępniające.

Dane te powinny być traktowane jako odrębne warstwy potrzebne do skomponowania określonych map oraz jako dane wsadowe do wykonania koniecznych analiz w celu wytworzenia kolejnych warstw i modeli w tym samym celu (tab. 75).

Uzyskanymi warstwami wektorowymi i rastrowymi należy uzupełnić przestrzenną bazę danych GIS (patrz: cz. II, rozdz. 9.1) przeznaczoną do gromadzenia, analizowania i przetwarzania danych przestrzennych. Jest to niezwykle istotne, gdyż uzupełniona w ten sposób baza danych, będzie stanowić możliwie pełne repozytorium danych przestrzennych o górotworze przeznaczonym na obiekt podziemny, co ułatwi przeprowadzenie niezbędnych analiz geostatystycznych.

8.4. DANE POWSTAJĄCE W WYNIKU BADAŃ GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Dane powstające w wyniku badań geologiczno-inżynierskich można gromadzić w bazie danych GIS, przeznaczonej do gromadzenia, analizowania i przetwarzania danych przestrzennych oraz w bazie danych otworowych.

Sposób gromadzenia danych powstających w wyniku tych badań zaproponowano i opisano w rozdziale 9 (cz II).

Tabela 75

Przykładowy zestaw danych cyfrowych nieotworowych

Lp.	Nazwa warstwy przestrzennej	Geometria warstwy	Dysponent/właściciel
1	Jednostki administracyjne	poligon	GUGiK
2	Złoża kopalin	poligon	PIG-PIB
3	Tereny górnicze	poligon	PIG-PIB
4	Obszary górnicze	poligon	PIG-PIB
5	Parki narodowe	poligon	GDOŚ
6	Parki krajobrazowe	poligon	GDOŚ
7	Rezerwaty	poligon	GDOŚ
8	Obszary chronionego krajobrazu	poligon	GDOŚ
9	Specjalne obszary ochrony (Natura 2000 SOO – „siedliskowa”)	poligon	GDOŚ
10	Obszary specjalnej ochrony (Natura 2000 OSO – „ptasia”)	poligon	GDOŚ
11	Obszary RAMSAR	poligon	GDOŚ
12	Powierzchniowe ruchy masowe ziemi – osuwiska	poligon	Starostwo powiatowe, SOPO
13	Tereny zagrożone ruchami masowymi ziemi	poligon	Starostwo powiatowe, SOPO
14	Obszary zagrożone podtopieniami	poligon	PIG-PIB
15	Mokradła	punkt/poligon*	IMUZ
16	Obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi wynosi raz na 500 lat (Q 0,2%), ISOK	punkt/poligon*	Wody Polskie

* w zależności od potrzeb, rodzaju i dostępności danych

GDOŚ – Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska; GUGiK – Główny Urząd Geodezji i Kartografii; IMUZ – Instytut Melioracji i Użytków Zielonych; ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju; PIG-PIB – Państwowy Instytutu Geologiczny – Państwowy Instytutu Badawczy; SOPO – System Osłony Przeciwosuwiskowej

9. WYKORZYSTANIE SYSTEMU INFORMACJI PRZESTRZENNEJ GIS DO GROMADZENIA DANYCH GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH

Proces dokumentowania geologiczno-inżynierskiego jest procesem kompleksowym, składającym się z wielu elementów. Na każdym jego etapie są zbierane różnego rodzaju dane, zarówno o geoprzestrzeni, podłożu gruntowym, jak i wszystkie inne, istotne dla prowadzonej inwestycji.

Gromadzone informacje obejmują dane pochodzące z materiałów archiwalnych oraz z różnego rodzaju analiz i badań wykonywanych na potrzeby prowadzonej inwestycji. Należą do nich zarówno dane analogowe, takie jak: mapy, plany, przekroje, profile otworów, dane geofizyczne, jak i cyfrowe. Wśród danych elektronicznych znajdują się te przetworzone z materiałów analogowych, jak również takie, które od początku były w postaci cyfrowej, w tym m.in. różnego rodzaju klasy obiektów w postaci wektorowych warstw przestrzennych, mapy w postaci rastrowej, dane projektowe CAD, ortofotomapy i zdjęcia satelitarne, numeryczne modele terenu itp.

Proces analizy przestrzennej zgromadzonych materiałów archiwalnych i danych zebranych podczas badań na potrzeby inwestycji ma na celu ustalenie i ocenę warunków geologiczno-inżynierskich oraz określenie parametrów geotechnicznych warstw gruntów i skał, co w konsekwencji pozwala na sporządzenie modelu geologicznego.

Standardowe, analogowe podejście do stworzenia jak najbardziej zbliżonego do rzeczywistości (czyli pełnego i dokładnego) modelu geologicznego jest długotrwałe i pracochłonne. Znacznie bardziej efektywne jest gromadzenie, integrowanie i przetwarzanie pozyskanych danych wykorzystując systemy informacji przestrzennej GIS za pomocą przestrzennych baz danych.

System GIS (ang. *Geographical/Geospatial Information System* – System informacji geograficznej/przestrzennej) to zestaw metod i narzędzi usprawniających i umożliwiających pozyskiwanie, gromadzenie, przetwarzanie, analizowanie, wizualizację i udostępnianie danych umiejscowionych w przestrzeni geograficznej. GIS integruje ze sobą wiele czynników, w tym użytkowników i ich doświadczenia, gotowe procedury operacyjne, dane przestrzenne i opisowe dane tabelaryczne, budujące razem bazy danych, a także odpowiedni sprzęt komputerowy wraz z wyspecjalizowanym oprogramowaniem, które może być zarówno komercyjne, jak i bezpłatne, oparte na licencji wolnego i otwartego oprogramowania. Do atutów programów GIS zalicza się m.in. (Majer i in., 2018):

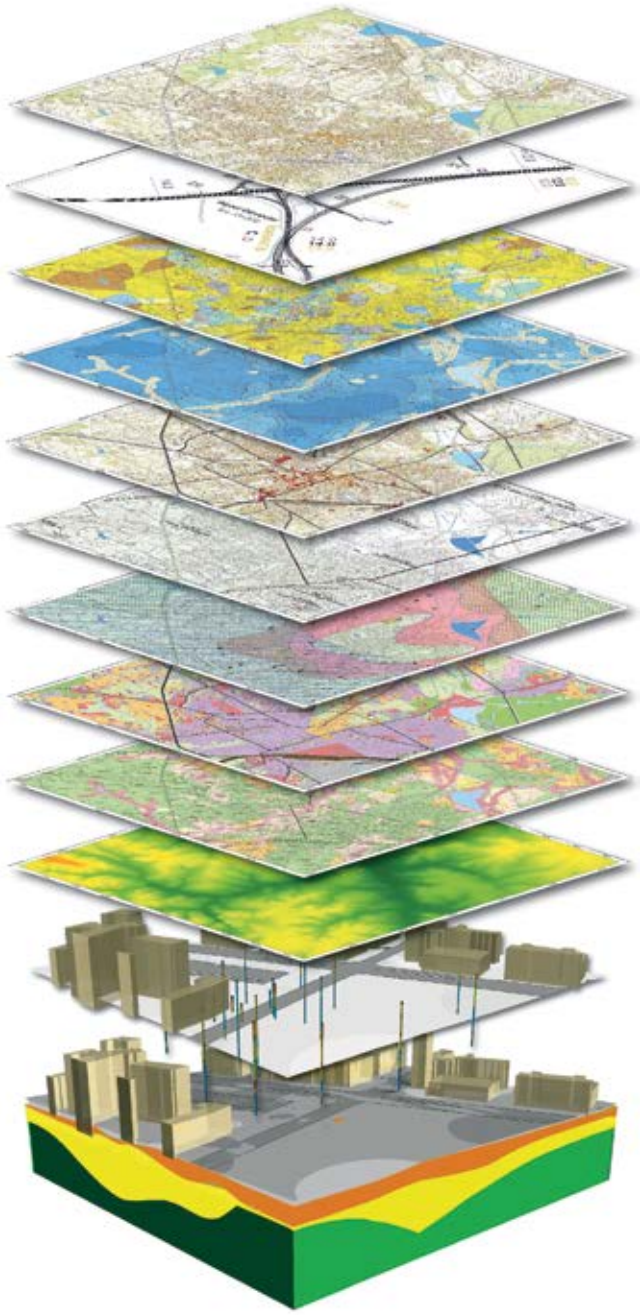
– grupowanie danych z wielu źródeł;
– integrowanie danych o różnych formatach i skalach;
– możliwość korzystania za pośrednictwem Internetu z publicznych zasobów danych i map zgromadzonych w bazach danych służb publicznych;
– szybkość i powtarzalność prowadzenia obiektywnych, wieloskładowych analiz;
– możliwość ciągłej aktualizacji danych uszczegóławiających budowany model;
– łatwość i powtarzalność tworzenia map, także w systemie arkuszowym;
– proste udostępnianie danych i map wytworzonych na potrzeby dokumentowania w postaci cyfrowej poprzez serwisy internetowe.

GIS jest środowiskiem rastrowych i przede wszystkim wektorowych warstw przestrzennych, co pozwala na integrację i wzajemne relacje danych tworzonych w różnych układach współrzędnych i odmiennych skalach. Umiejscawiając zgromadzone dane we wspólnej przestrzeni geograficznej, środowisko GIS umożliwia dokonywanie wieloskładowych analiz (tzw. geoprzetwarzanie), nakładanie na siebie wielu warstw informacyjnych (rys. 93) i komponowanie map przez wizualizację kartograficzną zdobytych i wytworzonych informacji, co w konsekwencji pozwala na uzyskanie różnorakich rozwiązań dla zagadnień będących przedmiotem dokumentowania geologiczno-inżynierskiego.

Praca w systemie GIS umożliwia szybkie, efektywne i sprawdzalne zobrazowanie tego, co prezentuje model geologiczny odzwierciedlający rzeczywistość. GIS, poza możliwością zrozumienia i poznania przestrzeni (nie tylko geologicznej) otaczającej obszar objęty dokumentową inwestycją, służy głównie do tworzenia map będących integralnym i niezbędnym elementem procesu dokumentowania.

Geoprzetwarzanie danych w systemie GIS daje wiele możliwości wizualizowania informacji o przestrzeni na każdym etapie realizacji inwestycji. Wykorzystując technologię GIS, można łatwo i szybko złożyć oraz przetworzyć wiele danych przestrzennych. Dzięki temu możliwe jest wygenerowanie niezbędnych map związanych z dokumentowaniem, począwszy od mapy lokalizacyjnej i dokumentacyjnej, poprzez mapę tektoniczną i strukturalną, a skończywszy na mapach warunków geologiczno-inżynierskich, będących wynikiem wieloczynnikowych analiz przestrzennych.

Dzięki geoprzetwarzaniu mogą także powstać mniej lub bardziej skomplikowane modele 3D, które obrazując budowę geologiczną dokumentowanej geoprzestrzeni, wspomagają dokonanie interpretacji budowy geologicznej, ułatwiając tym samym zrozumienie procesów zachodzących w górotworze.



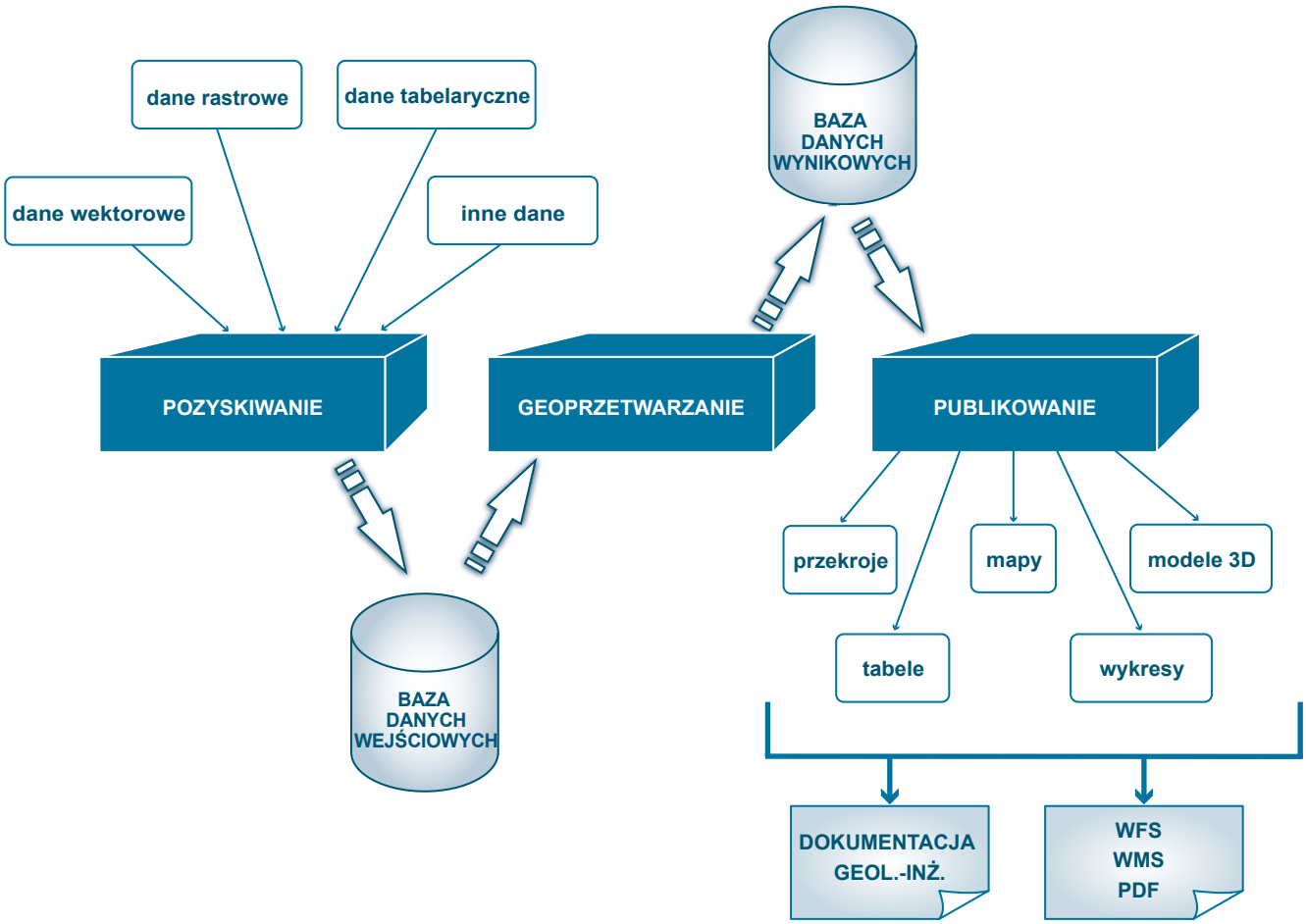
Rys. 93. Warstwowa struktura modelu GIS (dane PIG-PIB)

Praca w środowisku GIS pozwala na zgromadzenie i zintegrowanie danych niezbędnych w dokumentowaniu. Przede wszystkim umożliwia ich geoprzetwarzanie i w rezultacie opracowanie kompleksowego i wielowarstwowego geologicznego modelu dla dokumentowanej geoprzestrzeni. Zaimplementowanie i zwizualizowanie w modelu informacji w postaci kart profili otworów dokumentacyjnych (model 1D), przekrojów i map (model 2D) lub blokdiagramów (model 3D) pozwala wykorzystać je na każdym etapie prowadzonej inwestycji.

Ze względu na dane, pracę w systemie GIS można podzielić na trzy etapy (rys. 94), które są zbieżne z etapowością procesu dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (Kwiecień, 2009). Każdy z etapów wymaga odmiennego podejścia, jednak mimo tego są ze sobą mocno powiązane, gdyż każdy kolejny opiera się na wynikach poprzedniego:

- **Pozyskiwanie** – wyszukiwanie, gromadzenie i integracja danych: etap ten zajmuje się zbieraniem, wprowadzaniem, gromadzeniem oraz przechowywaniem w bazie lub bazach danych informacji wykorzystywanych podczas dokumentowania. Przede wszystkim są to wektorowe, przestrzenne dane, ale także związane z nimi relacyjnie dane tabelaryczne, umiejscowione w przestrzeni dane rastrowe i bezpośrednie połączenia z zewnętrznymi źródłami danych. Powstałe w ten sposób bazy pozwalają na zarządzanie danymi, zapewniają ich spójność i integralność, co ułatwia ich weryfikację i umożliwia przeprowadzenie niezbędnych analiz.
- **Geoprzetwarzanie** – weryfikacja, analiza i przetwarzanie danych: głównym zadaniem na tym etapie jest przeprowadzenie złożonych analiz przestrzennych na podstawie wcześniej przygotowanej bazy lub wielu baz danych. Analizy te wykorzystują możliwość przestrzennych relacji i geostatystycznych zależności między różnymi obiektami, co umożliwia wytworzenie nowych informacji wspierających proces dokumentowania geologiczno-inżynierskiego. Jest to możliwe przede wszystkim dzięki uniwersalności środowiska GIS, w którym można analizować dane z różnych źródeł, w wielu formatach i w odmiennych układach współrzędnych.
- **Publikowanie** – wizualizacja, prezentacja i udostępnianie danych: ten etap przedstawia niezbędne informacje oraz wyniki dokumentowania przechowywane w bazie lub bazach danych w postaci tabel oraz wektorowych i rastrowych warstw. Dotyczy to zarówno danych zebranych na potrzeby udokumentowania inwestycji (etap 1), jak i będących wynikiem przeprowadzonego geoprzetwarzania (etap 2). Już samo odpowiednie zestawienie tabelaryczne informacji zawartych w bazie lub bazach danych usprawnia wgląd w informacje i ich graficzną obróbkę statystyczną w postaci diagramów i wykresów. Natomiast odpowiednio dokonane zwizualizowanie warstw przestrzennych (punkty, polilinie i poligony, rastry) umożliwia zaprezentowanie rezultatów dokumentowania w postaci przekrojów, map, a nawet modeli i animacji 3D. Obrazowanie informacji w sposób czytelny i jednoznaczny jest możliwe dzięki zastosowaniu uniwersalnej, jednolitej symbolizacji oraz opisaniu obiektów właściwymi etykietami. Jest to uniwersalną cechą środowiska GIS, które nie tylko umożliwia szybkie przygotowanie danych w formie załączników graficznych, lecz także pozwala na ich szybkie udostępnianie i upublicznienie na przykład za pomocą usług takich jak WMS (*Web Map Service*) lub WFS (*Web Feature Service*).

Wynikiem pracy w środowisku GIS jest baza danych, która ma zawierać wszelkie dane przestrzenne dotyczące prowadzonej inwestycji. Baza powinna być traktowana jako



Rys. 94. Schemat podziału pracy na etapy w środowisku GIS

stałe repozytorium danych, a w efekcie – wykorzystywana jako archiwum danych przedstawiających szeroko pojęty model geologiczny.

Zebrane, wytworzone i przechowywane w bazie informacje mogą być powszechnie udostępniane oraz wykorzystywane, gdy zaistnieje taka potrzeba w czasie eksploatacji obiektu będącego efektem realizacji inwestycji lub podczas jej kolejnych etapów. Powstała baza może być także wykorzystana podczas wykonywania nowej, niepowiązanej inwestycji. Wówczas dane z bazy GIS są traktowane już jako archiwalne, tym samym rozpoczynają nowy cykl obiegu informacji o geoprzestrzeni, w ramach którego model geologiczny jest uzupełniany o nowe informacje (rys. 95).

Rys. 95. Cykl obiegu i wykorzystania danych w środowisku GIS

9.1. BAZA DANYCH

Dane niezbędne do celów realizacji inwestycji są podstawą analiz i oceny wyników badań. Zakres gromadzonych i wytwarzanych danych jest bardzo szeroki. W związku z tym niezwykle ważne jest nie tylko odpowiednie dobranie i przygotowanie, lecz także właściwie zorganizowanie danych o geoprzestrzeni, w celu optymalizacji kosztów gromadzenia,

przetwarzania, archiwizowania i wykorzystywania na każdym etapie realizacji inwestycji.

Najlepszym do tego rozwiązaniem jest zebranie danych w jednym miejscu, w formie bazy danych, rozumianej jako repozytorium wszelkiej cyfrowej informacji (wektorowej i tabelarycznej) o geoprzestrzeni realizowanej inwestycji i jej sąsiedztwie. Zazwyczaj jest to rzeczywista baza danych obsługiwana przez odpowiednie oprogramowanie GIS. Mogą to być także odpowiednio przygotowane struktury katalogowe, w których umieszcza się tabele i pliki wektorowe zapisane w niebazodanowych formatach (TXT, XLS, SHP).

Zaleca się, żeby stosować jeden określony sposób gromadzenia danych podczas całego procesu realizacji inwestycji. Należy jednoznacznie wybrać pomiędzy standardową bazą danych a strukturą plikowo-katalogową. Ułatwi to pracę z danymi i usprawni zarządzanie informacją opisującą geoprzestrzeń związaną z inwestycją.

9.2. WARSTWY WEKTOROWE I RASTROWE

Podstawą ergonomicznego korzystania z bazy danych przy wykorzystaniu środowiska GIS jest właściwe przygotowanie oraz standaryzacja danych pozyskiwanych na każdym etapie realizacji inwestycji. Tabele i dane przestrzenne opisujące przestrzeń podziemną, powierzchnię terenu i sąsiedztwo inwestycji powinny być zapisywane jako warstwa/element (ang. *feature*) w ogólnodostępnych bazach danych lub jako pliki wektorowe w strukturach katalogowych w otwartych formatach (np. SHP). Ponadto powinny być w pełni edytowalne, a w przypadku danych wektorowych i rastrowych mieć przypisane odwzorowanie kartograficzne. Zarówno dane umieszczone w bazach danych, jak i pliki zawarte w strukturach katalogowych powinny być gromadzone i utrzymywane zgodnie z przypisanymi/ustalonymi schematami ich nazw, formatów i struktur wewnętrznych (tab. 76).

Dobrym rozwiązaniem jest zunifikowanie wszystkich gromadzonych i wytwarzanych warstw (tab. 76), tak żeby na każdym etapie realizacji inwestycji i w każdym momencie mogły być one w prosty i łatwy sposób wykorzystane zarówno do tworzenia odpowiednich, ujednoliconych wizualnie kompozycji mapowych, jak i do analiz przestrzennych dających odpowiedź na niezbędne pytania związane z inwestycją. Elementem uzupełniającym zbiory danych przestrzennych są słowniki (tabele słownikowe) ustalające powiązania między danymi i porządkujące nazewnictwo, symbolikę oraz terminologię pojęć stosowaną podczas realizacji inwestycji.

Należy pamiętać, że dane analogowe nie mogą być bezpośrednio przetwarzane w środowisku GIS. Należy je właściwie przygotować przez cyfryzację/wektoryzację i referencję w przestrzennym układzie współrzędnych.

Tabela 76

Przykładowy zestaw plików warstw wektorowych ze zestandaryzowanym nazewnictwem plików warstw

Lp.	Nazwa warstwy przestrzennej	Nazwa pliku warstwy	Geometria warstwy
1	**2**	**3**	**4**
1	Obszar projektowanych badań	INWESTYCJA_..._projekt_obszar_badan.shp	poligon
2	Obszar badań	INWESTYCJA_..._obszar_badan.shp	poligon
3	Skorowidz arkuszy mapy skali 1:5000	INWESTYCJA_..._skorowidz_5k.shp	poligon
4	Elementy powierzchniowe zidentyfikowane podczas kartowania geo-inż.	INWESTYCJA_..._elementy_kart_geo-inz.shp	poligon
5	Obiekty zidentyfikowane podczas kartowania geo-inż.	INWESTYCJA_..._obiekty_kart_geo-inz.shp	punkt
6	Jednostki geomorfologiczne	INWESTYCJA_..._jednostki_gmrf.shp	poligon
7	Hydroizohipsy pierwszego zwierciadła w obrębie warstwy wodonośnej	INWESTYCJA_..._hydroizo_prw_zwierciadlo.shp	linia
8	Głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła	INWESTYCJA_..._glebokosc_dprw_zwierciadla.shp	poligon
9	Głębokość pierwszego nawierconego zwierciadła	INWESTYCJA_..._glebokosc_prw_zwierciadla.shp	punkt
10	Punkty dokumentacyjne ze stwierdzoną wodą gruntową	INWESTYCJA_..._hydro_pkt_dok_zw.shp	punkt
11	Punkty dokumentacyjne z niestwierdzoną wodą gruntową	INWESTYCJA_..._hydro_pkt_dok_bzw.shp	punkt
12	Kierunki spływu wód gruntowych pierwszego zwierciadła	INWESTYCJA_..._hydro_splyw.shp	punkt
13	Potencjalne powierzchniowe ogniska zanieczyszczeń	INWESTYCJA_..._zagrozenie_zidentyfikowane_poly.shp	poligon
14	Potencjalne punktowe ogniska zanieczyszczeń	INWESTYCJA_..._zagrozenie_zidentyfikowane_pkt.shp	punkt
15	Projektowane punkty dokumentacyjne	INWESTYCJA_..._projekt_punkt_dok.shp	punkt
16	Archiwalne punkty dokumentacyjne	INWESTYCJA_..._archiw_punkt_dok.shp	punkt
17	Punkty dokumentacyjne	INWESTYCJA_..._punkt_dok.shp	punkt

Tabela 76 cd.

1	2	3	4
18	Projektowane ciągi geofizyczne	INWESTYCJA_..._projekt_geofizyka_lin.shp	linia
19	Projektowane badania geofizyczne	INWESTYCJA_..._projekt_geofizyka_pkt.shp	punkt
20	Archiwalne ciągi geofizyczne	INWESTYCJA_..._arch_geofizyka_lin.shp	linia
21	Archiwalne badania geofizyczne	INWESTYCJA_..._arch_geofizyka_pkth.shp	punkt
22	Ciągi geofizyczne	INWESTYCJA_..._geofizyka_lin.shp	linia
23	Badania geofizyczne	INWESTYCJA_..._geofizyka_pkt.shp	punkt
24	Archiwalne linie przekrojów	INWESTYCJA_..._arch_linia_przekroju.shp	linia
25	Linie przekrojów	INWESTYCJA_..._linia_przekroju.shp	linia
26	Spadki terenu	INWESTYCJA_..._spadek_terenu.shp	poligon
27	Hydroizohipsy odwadnianego poziomu przed odwodnieniem	INWESTYCJA_..._hydroizo_bez_odwodnienia.shp	linia
28	Zasięg leja odwodnień	INWESTYCJA_..._lej_odwodnienia.shp	poligon
29	Hydroizohipsy odwadnianego poziomu wodonośnego	INWESTYCJA_..._hydroizo_lej_odwodnienia.shp	linia
30	Zasięg złoża	INWESTYCJA_..._zasięg_zloza.shp	poligon
31	Punkty dokumentacyjne sięgające złoża	INWESTYCJA_..._punkt_dok_zloza.shp	punkt
32	Sumaryczna miąższość złoża	INWESTYCJA_..._miazszosc_zloza.shp	poligon
33	Izolinie sumarycznej miąższości złoża	INWESTYCJA_..._miazszosc_zloza_lin.shp	linia
34	Głębokość stropu złoża	INWESTYCJA_..._strop_zloza.shp	poligon
35	Izolinie głębokości stropu złoża	INWESTYCJA_..._strop_zloza_lin.shp	linia
36	Głębokość spągu złoża	INWESTYCJA_..._spag_zloza.shp	poligon
37	Izolinie głębokości złoża	INWESTYCJA_..._spag_zloza_lin.shp	linia
38	Miąższość efektywnej formacji chłonnej	INWESTYCJA_..._miazszosc_formacji.shp	poligon
39	Izolinie miąższości efektywnej formacji chłonnej	INWESTYCJA_..._miazszosc_formacji_lin.shp	linia
40	Porowatość efektywna formacji chłonnej	INWESTYCJA_..._porowatosc_efekt.shp	poligon
41	Izolinie porowatości efektywnej formacji chłonnej	INWESTYCJA_..._porowatosc_efekt_lin.shp	linia
42	Granice zasięgu koncesji poszukiwawczych	INWESTYCJA_..._zasieg_koncesji_posz.shp	linia
43	Głębokość stropu utworów nieprzepuszczalnych	INWESTYCJA_..._glebokosc_nieprzepuszczalne.shp	poligon
44	Punkty dokumentacyjne sięgające stropu utworów nieprzepuszczalnych	INWESTYCJA_..._nieprzepuszczalne_punkt_dok.shp	punkt
45	Warunki budowlane	INWESTYCJA_..._warunki_budowlane.shp	poligon
46	Nośność podłoża w poziomie posadowienia	INWESTYCJA_..._nosnosc_punkt_dok.shp	punkt
47	Warunki geotechniczne	INWESTYCJA_..._warunki_geotechniczne.shp	poligon
48	Warunki geologiczno-inżynierskie w poziomie posadowienia	INWESTYCJA_..._warunki_geo-inz.shp	poligon
49	Przydatność gruntów na potrzeby budownictwa	INWESTYCJA_..._przydatnosc_dla_budownictwa.shp	poligon
50	Przebieg stref uskokowych	INWESTYCJA_..._strefy_uskokowe.shp	linia

Odpowiednio przygotowane, pozyskane, uporządkowane i zweryfikowane dane, mające informacje o odwzorowaniu kartograficznym, mogą być wykorzystane do przetwarzania w środowisku GIS. Dane o geoprzestrzeni i sąsiedztwie inwestycji utrzymywane i archiwizowane w bazach danych lub systemach katalogowych są podstawą do tworzenia dokumentacji, kompozycji mapowych oraz łatwo dostępnych banków informacji o inwestycji podczas całego procesu jej realizacji.

9.3. TABELE ATRYBUTÓW

Każda z wykorzystywanych warstw przestrzennych w środowisku GIS niesie ze sobą wiele informacji, istotnych z punktu widzenia realizacji inwestycji. Są one zarówno podstawą, jak i wynikiem wszelkiego rodzaju analiz, w tym statystycznych i geoprzestrzennych. Dane te są zebrane i przechowywane w tabeli atrybutów dla każdej warstwy z osobna. Jest to element składowy wszystkich warstw wektorowych i wybranych warstw rastrowych.

Tabele atrybutów powinny mieć zunifikowaną, zestandaryzowaną i czytelną strukturę, ustaloną na samym początku procesu realizacji inwestycji (tab. 77). Dotyczy to wszystkich warstw wektorowych wykorzystywanych jako źródło danych w analizach geoprzestrzennych i kompozycjach mapowych.

W przypadku danych zewnętrznych są to w głównej mierze dane referencyjne, które z punktu widzenia użytkowego mają już zoptymalizowaną strukturę tabel atrybutów. Należy korzystać z nich w formie niezmienionej, zarówno w celu przeprowadzania analiz geoprzestrzennych, jak i wykorzystania w kompozycjach mapowych np. za pomocą etykiet.

Natomiast wynikiem cyfryzacji danych analogowych, jak i przeprowadzonych analiz geoprzestrzennych w środowisku GIS, są nowe dane wektorowe. Struktura i zawartość ich tabel atrybutów powinna być zunifikowana, zestandaryzowana i zoptymalizowana pod względem użyteczności. Zaleca się, żeby podczas tworzenia warstwy konstruować tabele atrybutów zawierające tylko te informacje, które są niezbędne dla analiz geostatystycznych i kompozycji mapowych (tab. 77). Należy rezygnować ze zbędnych informacji, często obciążających pliki warstw oraz utrudniających czytelność tabeli i przeprowadzanie analiz geostatystycznych.

Właściwie skonstruowana tabela atrybutów jest nie tylko podstawową bazą informacji, lecz także bardzo dobrym narzędziem podczas nawigowania po warstwie i kompozycji mapowej. Odpowiednio ułożona, zestandaryzowana struktura tabel atrybutów warstw wektorowych pozwala na proste korzystanie z nich oraz na łatwe odczytanie zawartych w nich danych. Umożliwia także efektywne wykorzystywanie danych w konstruowaniu kompozycji mapowych przez wyświetlanie na mapach/modelach wymaganych informacji i odpowiednich etykiet opartych na tabelach atrybutów. Pozwala także na scalanie warstw z różnych etapów realizowanej inwestycji.

Tabela 77

Przykładowa, zoptymalizowana struktura tabeli atrybutów dla warstwy „punkty dokumentacyjne”

INWESTYCJA_..._punkt_dok.shp						
COLUMN NAME	DATATYPE	PRECISION	LENGTH	SCALE	ALIAS	GEOMETRY TYPE
OBJECTID (FID)	Object ID					
SHAPE	Geometry					Point
Nazw_Inw	Text		33		Nazwa inwestycji	
Nazwa_Pkt	Text		20		Nazwa punktu dokumentacyjnego	
X_PL1992	Double/Float	9		3	X-PL1992	
Y_PL1992	Double/Float	9		3	Y-PL1992	
H	Double/Float	5		2	Rzędna w m n.p.m.	
Gleb_Pkt	Double/Float	5		2	Głębokość punktu dokumentacyjnego w m	
Rodz_Pkt			125		Rodzaj punktu dokumentacyjnego	
Probki	Text		3		Pobrano próbkę gruntu/skały	
Rodz_Prob	Text		125		Rodzaj pobranej próbki gruntu/skały	
Data_Pkt	Text		10		Data wykonania punktu dokumentacyjnego	
Dozor	Text		33		Osoba dozorująca wiercenie/badanie	
Info	Text		254		Dodatkowe informacje	
Wykonawca	Text		254		Wykonawca dokumentacji	

9.4. METADANE

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 30 października 2006 r w sprawie niezbędnych elementów struktury dokumentów elektronicznych (Rozporządzenie..., 2006) wszystkie opracowania wytwarzane w formie dokumentu elektronicznego powinny być opisane metadanymi, czyli zestawem logicznie powiązanych z dokumentem elektronicznym informacji opisujących ten dokument. Obowiązkowym zakresem informacji zawartej w metadanych jest: identyfikator, twórca, tytuł, data, format, dostęp, typ, relacja, odbiorca, grupowanie, kwalifikacja, język, opis, uprawnienia.

W związku z tym, wszystkie dane przestrzenne przygotowywane w środowisku GIS powinny być opisane metadanymi, które są istotnym elementem każdego zbioru danych, w tym każdej warstwy wektorowej. Metadane są kluczem pozyskania dostępu, zrozumienia i wykorzystania informacji zawartych w danych przestrzennych. Z punktu widzenia realizacji inwestycji, powinny informować m.in. o: rodzaju i strukturze danych, o istniejących ograniczeniach, o tym co dane przedstawiają, przez kogo i w jaki sposób zostały wytworzone, kto jest ich właścicielem i w jaki sposób je cytować. W związku z tym warstwy powinny być opisane metadanymi w następującym obowiązkowym zakresie:

- nazwa warstwy (*title*);
- słowa kluczowe (*tags*);
- opis skrócony warstwy (*summary*);
- opis warstwy (*description*), w tym:
  - data utworzenia (dzień, miesiąc, rok),
  - daty aktualizacji (dzień, miesiąc, rok),
  - rodzaj danych,
  - pochodzenie danych,
  - opis zawartości warstwy,
  - przeznaczenie warstwy,
  - opis procesu tworzenia warstwy;
- właściciel warstwy (*credits*);
- ograniczenia używania warstwy (*use limitation*);
- zasięg przestrzenny warstwy (*extent*);
- referencyjny przedział skal (*scale range*).

9.5. KOMPOZYCJE MAPOWE

Praca w środowisku GIS umożliwia szybką i nieskomplikowaną kompozycję map opartych na danych zawartych w bazach danych. Kompozycje mogą być zmieniane w zależności od potrzeb i przybywających informacji o geoprzestrzeni. W związku z tym, jeżeli wymaga tego sytuacja, w każdym momencie realizacji inwestycji mogą być wykonywane i wykorzystane mapy o różnej tematyce.

Docelowo jednak, w procesie dokumentowania, środowisko GIS poza przeprowadzaniem analiz geoprzestrzennych służy do tworzenia zbioru cyfrowych map, stanowiących załączniki kartograficzne do opracowań tekstowych takich jak np. projekt robót geologicznych i dokumentacja geologiczno-inżynierska. Wykorzystanie w tym celu środowiska GIS pozwala na proste z punktu widzenia inwestycji zobrazowanie istotnych elementów w odpowiedniej skali.

W zależności od rodzaju inwestycji oraz rodzaju opracowywanego dokumentu (projekt robot geologicznych, dokumentacja geologiczno-inżynierska) wymagane są odmienne zestawy map. Każda z map, będąc załącznikiem graficznym, przedstawia różny stopień szczegółowości, który jest uzależniony od celu mapy, przedstawianej treści, rodzaju inwestycji, rodzaju podziemnego obiektu, przeznaczenia i typu dokumentu w jakim jest umieszczona. Dlatego mapy należy opracować w odpowiedniej skali, a co za tym idzie, zgodnie z rozporządzeniem w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Rozporządzenie..., 2012). Każda mapa powinna być opracowana i przedstawiona w obowiązującym układzie współrzędnych.

Oprócz podstawowych elementów i informacji budujących treść mapy, każda mapa powinna mieć unikatowe identyfikatory arkuszy map, tytuł, symbol wskazujący północ lub/i siatkę kartograficzną, skalę i podziałkę metryczną, nazwę i numer arkusza oraz zestandaryzowane objaśnienia omawiające elementy przedstawione na mapie.

Treść każdej mapy powinna być uzupełniana informacją topograficzną, umożliwiającą lokalizację przedstawianych elementów. Dla map szczegółowych wymagających prezentowania treści w dużej skali (np. 1:500 lub 1:1000) przedstawiających naziemne rozwiązania, obiekty budowlane i elementy infrastruktury obsługujących inwestycję, jako podkład topograficzny powinny być wykorzystane mapy zasadnicze (dystrybuowane przez urzędy powiatowe) lub mapy do celów projektowych, tworzone na potrzeby konkretnego obiektu.

Przy tworzeniu map małoskalowych, syntetycznych, przedstawiających problematykę całego obszaru inwestycji należy natomiast korzystać z podkładów topograficznych w układzie PL-1992, w skali odpowiednio dobranej do zasięgu obszarowego przedstawianej problematyki. Mogą to być rastrowe podkłady topograficzne, jednak mimo wszystko podstawę powinna stanowić Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). Jest ona przeznaczona dla skali 1:10 000, jednak generalizując informacje zawarte w bazie, można ją wykorzystać do map w mniejszych skalach, takich jak 1:50 000 czy 1:100 000 lub skorzystać z bazy Danych Obiektów Ogólnogeograficznych (BDOO) – dla skal mniejszych niż 1:100 000.

Należy pamiętać, że zarówno topograficzne podkłady rastrowe, jak i BDOT10k powinny zostać pozyskane bezpośrednio z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii.

10. KRAJOWE DOŚWIADCZENIA DOTYCZĄCE SPORZĄDZANIA DOKUMENTACJI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH NA POTRZEBY PODZIEMNEGO BEZZBIORNIKOWEGO MAGAZYNOWANIA I PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA

Pierwsze opracowania analityczne dotyczące podziemnego magazynowania, jakie znajdują się w zasobach NAG, pochodzą z drugiej połowy lat 50. i z lat 60. XX w. Pod koniec lat 70. powstały pierwsze projekty badań geologicznych w celu określenia przydatności wybranych złóż gazu do magazynowania (Brzeźnica, Husów). W wyniku wprowadzenia w 1994 r. ustawy pgg, pod koniec lat 90. pojawiły się pierwsze dokumentacje geologiczno-inżynierskie na potrzeby magazynowania lub składowania. W latach 90. zaczęły się pojawiać także pierwsze projekty krajowe i międzynarodowe dotyczące wstępnego rozpoznania możliwości podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz eksperymenty zatłaczania gazu na niewielką skalę do złoża Borzęcin oraz złóż węgla Kaniów. W ostatnich latach przedmiotem zainteresowania stało się magazynowanie energii w postaci ciepła, sprężonego powietrza lub wodoru, nie ma jeszcze opracowanej żadnej dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla tego celu, a jedynie wstępne opracowania traktujące o możliwości prowadzenia takiej działalności.

Z uwagi na zlokalizowanie istniejących obiektów w obrębie struktur złożowych, opisane w niniejszym rozdziale opracowania geologiczno-inżynierskie bazują w znacznym stopniu na wynikach badań archiwalnych, jakie wykonano na potrzeby poszukiwania i rozpoznawania złoża, a później w trakcie jego eksploatacji. Częstą praktyką jest wykorzystywanie rdzeni zgromadzonych w Archiwum Rdzeni NAG, prowadzonego w PIG-PIB, na potrzeby charakterystyki petrograficznej, właściwości fizycznych i wytrzymałościowych górotworu. Starsze opracowania sprzed wejścia w życie ustawy pgg z 1994 r., to programy badawcze lub projekty prac geologicznych. W przypadku obiektów funkcjonujących od lat 70., dokumentacje geologiczno-inżynierskie powstały w momencie odnawiania kończącej się koncesji, żeby spełnić wymagania ustawy pgg w zakresie konieczności dołączania do wniosku koncesyjnego dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Zatem dla wielu obiektów pierwsze takie dokumentacje powstawały dopiero po 2005 r., kiedy zaczęło obowiązywać rozporządzenie w sprawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016). Dokumentacje te bazują wyłącznie na opracowaniach i badaniach archiwalnych, w tym w szczególności na dokumentacjach złożowych, geologiczno-złożowych, hydrogeologicznych oraz dokumentacjach wynikowych otworów eksploatacyjnych i opracowaniach typu studia wykonalności, czy opracowania regionalne dla struktury. W wielu przypadkach odróżnienie, które wyniki badań są archiwalne, a które pochodzą z bieżących prac jest bardzo trudne.

Na podstawie wybranych, dotychczasowych dokumentacji geologiczno-inżynierskich przeprowadzono analizę ich zawartości. Wykorzystano opracowania dla 14 lokalizacji: Bonikowo, Daszewo, Góra, Kosakowo, Mostowe Błota, Mogilno, Henrykowice, Brzeźnica, Husów, Husów–Albigowa–Krasne, Strachocina, Swarzów oraz Buk.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dokumentacje geologiczno-inżynierskie z uwagi na konieczność zachowania zgodności z rozporządzeniem (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) mają dość podobny zakres tematyczny, jednak o różnym stopniu szczegółowości. Można w nim wyodrębnić trzy zasadnicze części:

- ogólne dane o obiekcie i lokalizacji, tj. dane dotyczące położenia, rodzaju formacji geologicznej, rodzaju obiektu i jego podstawowych parametrów, dane technologiczne oraz te dotyczące dotychczasowego zagospodarowania lokalizacji oraz górotworu;
- opis badań wykonanych na potrzeby dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz zakres wykorzystanych danych archiwalnych;
- ocena i interpretacja zgromadzonych danych wraz z ich wizualizacją oraz sformułowaniem istotnych do projektowania obiektu podziemnego wniosków.

10.1. OGÓLNE DANE O OBIEKCIE I LOKALIZACJI W DOKUMENTACJACH ARCHIWALNYCH

W aspekcie zawartości dokumentacji geologiczno-inżynierskiej w świetle wymagań rozporządzenia (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) oraz praktyki dokumentatorów, dane o obiekcie można w skrócie podzielić na: **podstawowe**, **techniczne** oraz **geologiczne**.

Dane podstawowe o obiekcie stanowią element identyfikacyjny niemal wszystkich dokumentacji. Są to w szczególności:

- nazwa obiektu i jego operator;
- rodzaj planowanej działalności;
- położenie geograficzne obiektu;
- granice obszaru i terenu górniczego;

– kategoria geotechniczna (dotyczy wyłącznie części naziemnej obiektu).

W większości przypadków dane te są przywołane w stopniu wystarczającym. Najsłabiej wypada kwestia określania granic obszaru i terenu górniczego oraz stopnia skomplikowania warunków geologiczno-inżynierskich – te informacje często są pomijane lub określane bardzo ogólnie, np. druga lub trzecia kategoria geotechniczna.

Dane techniczne stanowią dość rozbudowany trzon analizowanych dokumentacji, w większości przypadków są wystarczające do oszacowania wielkości i złożoności planowanej inwestycji.

Do danych technicznych należy zaliczyć:
– rodzaj i ilość substancji/odpadu przeznaczonej do magazynowania/składowania;
– pojemność magazynu/składowiska;
– charakterystyka substancji/odpadu;
– charakterystyka magazynu/składowiska;
– charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych działalności.

Większość analizowanych dokumentacji dotyczyła magazynowania gazu ziemnego. Jego parametry z podziałem na procentową zawartość poszczególnych gazów, są dosyć szczegółowo scharakteryzowane we wszystkich dokumentacjach. W przypadku dokumentacji na potrzeby składowania podane są zarówno rodzaje odpadów przewidzianych do zatłaczania wraz z odpowiednimi kodami, jak i ich ilość w m^3/rok.

Charakterystyka magazynu/składowiska przedstawiana jest w podziale na część naziemną, podziemną oraz obiekty położone poza magazynem/składowiskiem, zgodnie z rozporządzeniem ws. dokumentacji geologiczno-inżynierskich.

Część podziemną stanowią ługowane od podstaw kawerny solne, zaadaptowane komory poeksploatacyjne lub otwory eksploatacyjne (w tym także horyzontalne). Część otworów to wcześniejsze otwory eksploatacyjne, zrekonstruowane i odpowiednio zabezpieczone z dostosowaną do działalności konstrukcją. W przypadku takich otworów możliwość ich wykorzystania jest poprzedzona analizą ich konstrukcji, badaniem stanu technicznego, najczęściej metodami geofizycznymi, oraz analizą rodzaju i stanu technicznego uzbrojenia nawierzchniowego.

We wszystkich analizowanych opracowaniach zawarte były szczegółowe informacje na temat głębokości zalegania warstwy przeznaczonej do magazynowania lub składowania, planowanej liczby komór i ich pojemności oraz filarów między komorami, a także półek stropowych i spągowych (dotyczy obiektów kawernowych).

Część naziemną stanowią obiekty budowlane i rurociągi, których liczba i rodzaj zależy od rodzaju i skali inwestycji. W przypadku magazynów gazu są to np. obiekty związane z procesami technologicznymi charakterystycznymi dla ropy lub gazu, m.in.:
– stacje: redukcyjno-pomiarowe, sprężania, osuszania, rozdziału gazu (w zależności od zatłaczanej substancji);
– filtry przeciwolejowe, przeciwpyłowe itp.;
– pompownie i tłocznie;
– separatory;
– rurociągi i gazociągi;
– głowice otworów;
– aparatura sterująca i kontrolno-pomiarowa;
– zbiorniki buforowe solanki, zbiorniki glikolu, wody złożowej, dozowania metanolu;
– kotłownie.

W przypadku magazynów kawernowych w soli są to dodatkowo obiekty związane z procesem ługowania:
– place przyotworowe;
– drogi dojazdowe do otworów;
– rurociągi zbiorcze;
– zakład ługowniczy;
– zbiorniki solanki i wody technologicznej;
– pompownie;
– budynki zaplecza;
– place manewrowe, ciągi komunikacyjne.

W przypadku składowania odpadów są to obiekty związane z tymczasowym magazynowaniem odpadu i jego oczyszczaniem i zatłaczaniem.

Do obiektów położonych poza magazynem/składowiskiem zalicza się m.in.:
– rurociągi przyłączeniowe do operatora;
– rurociągi metanolu;
– ujęcie wody technologicznej, rurociąg wody technologicznej, punkt zrzutu solanki do morza lub rzeki wraz z instalacjami.

Przykładową część naziemną magazynu gazu Wierzchowice przedstawiono na rysunku 96.

Charakterystyka rozwiązań technicznych i technologicznych zakładu polega głównie na mniej lub bardziej szczegółowym opisie procesu zatłaczania i odbioru gazu, a w przypadku składowania – głównie sposobu oczyszczania i zatłaczania odpadów. Tutaj najistotniejszą część, dosyć dobrze udokumentowaną i popartą obliczeniami stanowi sprawdzenie wymagań dotyczących konstrukcji otworów tłocznych i technologii zatłaczania, przede wszystkim w kwestii maksymalnego ciśnienia zatłaczania, które nie może przekroczyć ciśnienia szczelinowania górotworu oraz zabezpieczenia otworów przed możliwością niekontrolowanych przecieków odpadów do warstw położonych powyżej warstwy chłonnej. W przypadku składowania dużą uwagę poświęca się aspektom konstrukcyjnym samych otworów, sposobu ich zarurowania, cementacji i przeprowadzonych badań kontrolnych (głównie geofizycznych).

Dane geologiczne stanowią zasadniczy element dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i obejmują charakterystykę budowy geologicznej, warunków geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych oraz charakterystykę zagrożeń naturalnych i indukowanych. Zebrane dane geologiczne dostarczają informacji na temat: uwarunkowań geomorfologicznych, rodzaju struktury geologicznej i jej charakteru, głębokości zalegania, rozprzestrzenienia i miąższości warstwy przeznaczonej do prowadzenia działalności, wykształcenia i miąższości warstw nadkładu (ze szczególnym uwzględnieniem warstw izolujących), procesów tektonicznych, krasowych

Rys. 96. Część naziemna PMG Wierzchowice (https://pgnig.pl/pmg-wierzchowice)

oraz sufozyjnych, a także warunków hydrogeologicznych oraz stateczności górotworu.

Ponieważ większość udokumentowanych obiektów powstała w miejscu trwającej lub przeszłej działalności eksploatacyjnej, istotnym punktem jest opis przebiegu dotychczasowego rozpoznania złoża i jego eksploatacji. Opisy są szczegółowe, przedstawiona jest historia badań w podziale na badania geofizyczne, odwierty i badania laboratoryjne oraz zawierają szczegółowe dane na temat jakości wydobywanej kopaliny, wielkości i czasu trwania wydobycia, stwierdzonych zagrożeń w trakcie eksploatacji oraz sposobu zakończenia eksploatacji w miejscu przeznaczonym do składowania/magazynowania.

Istotnym elementem, lecz często bagatelizowanym, jest punkt opisujący czynniki brane pod uwagę przy wyznaczaniu granic przestrzeni, w której przewiduje się magazynowanie/składowanie. Wśród tych czynników najczęściej wymienia się:

- czynniki geologiczne, w tym:
  - minimalną graniczną miąższość złoża,
  - jednorodność złoża (w przypadku soli);
- stopień udokumentowania;
- posiadanie prawa do informacji geologicznej;
- przebieg granic typu: obszary chronione, ustalenia studium i planów miejscowych, obszary specjalne i strefy ochronne.

W odniesieniu do istniejących zakładów istotną rolę stanowią kryteria (ekologiczne, geologiczne i techniczne) doboru odwiertów do zatłaczania. Do czynników ekologicznych zalicza się minimalizację oddziaływania na poszczególne elementy środowiska (powietrze, gleba, woda, klimat, kopaliny, ludzie, zwierzęta i rośliny). Do czynników geologicznych zalicza się właściwości filtracyjne warstwy przeznaczonej do magazynowania lub składowania oraz stopień izolacji. Do czynników technicznych zalicza się właściwą konstrukcję otworu oraz jego stan techniczny.

10.2. ZAKRES BADAŃ I ANALIZ GEOLOGICZNYCH W DOKUMENTACJACH ARCHIWALNYCH

Część badawcza stanowi najistotniejszy element dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, ponieważ dostarcza danych niezbędnych do charakterystyki geologiczno-inżynierskiej struktury przeznaczonej do magazynowania/składowania, w tym w szczególności do oceny warunków geologiczno-inżynierskich.

W części tej są omawiane wykonane badania geofizyczne, prace wiertnicze (lub w wielu przypadkach po prostu wykorzystane rdzenie archiwalne), opróbowanie, badania *in situ*, pomiary w otworze oraz badania laboratoryjne.

Zgodnie z wymaganiami rozporządzenia w sprawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej (Rozporządzenie Ministra Środowiska..., 2016) budowę geologiczną magazynu/składowiska najczęściej opisuje się w podziale na warstwę magazynową/składową, warstwy uszczelniające oraz warstwy nadkładu. Sporadycznie pojawia się charakterystyka geologiczno-inżynierska warstw przypowierzchniowych.

Badania archiwalne są wykorzystane do charakterystyki geologiczno-inżynierskiej warstwy magazynowej, która obejmuje:

- opis litologiczny;
- charakterystykę parametrów fizycznych, mechanicznych oraz filtracyjnych;
- charakterystykę ciśnienia złożowego;
- charakterystykę ciśnienia w górotworze;
- charakterystykę ciśnienia szczelinowania.

W przypadku warstw nadkładu są to głównie:

- opis litologiczny;
- charakterystyka parametrów fizycznych, mechanicznych oraz filtracyjnych.

Dla warstw przypowierzchniowych jest to natomiast głównie charakterystyka geotechniczna pod kątem wilgotności, zagęszczenia i konsystencji oraz sporadycznie: gęstość, kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na ścinanie oraz moduł ściśliwości pierwotnej (edometryczny).

We wszystkich analizowanych dokumentacjach opróbowanie polegało na pobraniu próbek z archiwalnych rdzeni wiertniczych. Próbki pobierano zarówno z warstwy przeznaczonej do magazynowania lub składowania, jak i z wyżej leżących skał izolujących. Przykładowe liczby próbek dla wybranych materiałów archiwalnych podano w tabeli 78.

Z badań fizycznych na pobranych próbkach wykonywano standardowo następujące badania laboratoryjne:
- gęstości objętościowej w stanie powietrzno-suchym i nawodnionym;
- gęstości właściwej;
- porowatości całkowitej;
- nasiąkliwości wagowej.

Sporadycznie wykonywano badania petrograficzne, bazując głównie na badaniach archiwalnych. W przypadku soli wykonywano badania chemizmu na pobranych próbkach (w zakresie zawartości części nierozpuszczalnych oraz zawartości chlorku sodu i potasu, sporadycznie gazonośność).

Na próbkach wykonywano także standardowo laboratoryjne badania mechaniczne w następującym zakresie:
- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie powietrzno-suchym i nawodnionym;
- moduły sprężystości w stanie powietrzno-suchym i nawodnionym (moduł Younga i współczynnika Poissona);
- badania wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania w stanie powietrzno-suchym i nawodnionym (testy brazylijskie).

Większość badań została wykonana na próbkach foremnych. W sytuacji rozsypujących się fragmentów rdzenia, badanie przeprowadzono w formie punktowego obciążania wykonanego na fragmentach rdzenia.

W przypadku trzech dokumentacji (wszystkie dokumentacje solne) nie pobrano żadnych próbek, a cała analiza fizyczno-mechaniczna była oparta na danych archiwalnych z lat 90. Badania w tych dokumentacjach podzielono na badania wytrzymałościowe doraźne, w których założono, że czas obciążenia jest krótki i nie wpływa na wielkość odkształceń, a ich celem jest rozpoznanie właściwości sprężysto-plastycznych soli oraz reologiczne, określające wartość odkształceń lepkich, powiązanych ze zjawiskiem pełzania. Przeanalizowano wyniki od kilku do maksymalnie 30 oznaczeń następujących parametrów:
- badania doraźne:
  - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,
  - wytrzymałość na trójosiowe ściskanie,
  - moduł Younga (moduł odkształcenia osiowego), w jednoosiowym i w trójosiowym stanie naprężeń (przy naprężeniu bocznym 2 i 5 MPa),
  - współczynnik Poissona,
  - wytrzymałość na rozciąganie walcowej próbki skalnej,
  - wytrzymałość na zginanie,
  - wytrzymałość na ścinanie (wzdłuż wymuszonej powierzchni pod kątem 45 i 75 stopni);
- badania reologiczne:
  - pełzanie w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia,
  - pełzanie w warunkach trójosiowego stanu naprężenia,
  - relaksacja.

W jednej dokumentacji określono także właściwości ługownicze soli na podstawie oznaczeń szybkości ługowania stropowego i bocznego.

Jeśli chodzi o pomiary w otworach wiertniczych, analizie poddano wyniki profilowań geofizyki wiertniczej, w tym w szczególności profilowanie akustyczne oraz elektromagnetyczne. W jednym przypadku przywołano archiwalne badania: grawimetryczne, sejsmiczne, geoelektryczne metodą telluryczną, geotermiczne wykonane na potrzeby rozbudowy magazynu. Na podstawie analizy i processingu badań geofizyki wiertniczej określano:
- rodzaj i zawartość składników mineralnych;
- porowatość całkowitą;
- zawodnienie;
- dynamiczne parametry sprężystości oraz ciśnienia szczelinowania na postawie pomiarów akustycznych z pełnym obrazem falowym.

10.3. ZAKRES INTERPRETACJI I OCENY UZYSKANYCH DANYCH W DOKUMENTACJACH ARCHIWALNYCH

Interpretacja i analiza zebranych danych w przeanalizowanych dokumentacjach obejmuje w szczególności:
- charakterystykę geologiczno-inżynierską warstwy przeznaczonej do magazynowania lub składowania;
- charakterystykę warstw izolujących;
- charakterystykę warstw nadkładu;
- charakterystykę powierzchni terenu (rzadko);
- charakterystykę warunków hydrogeologicznych, w tym ocenę izolacji warstw wodonośnych i wpływ na istniejące stosunki wodne;
- ocenę stateczności geomechanicznej górotworu;

Tabela 78

Opróbowanie archiwalnych rdzeni wiertniczych – wybrane materiały archiwalne

Numer kolejny analizowanej dokumentacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Liczba próbek z rdzeni archiwalnych	12	26	0	0	0	28	8	17	25	60	13	6	10	28

– modelowanie (rzadko);
– ocenę zagrożeń na różnych etapach realizacji;
– ocenę wpływu na środowisko;
– zalecenia dla monitoringu (tab. 79–81);
– oceny dodatkowe (występowania wstrząsów, możliwości zanieczyszczenia wód itp.).

Charakterystyka geologiczno-inżynierska warstwy przeznaczonej do magazynowania lub składowania, to w szczególności opis litologii, formy zalegania, miąższości i parametrów filtracyjnych warstw (przepuszczalność oraz porowatość efektywna). W przypadku magazynów w wyeksploatowanych złożach ropy i gazu dodatkowo podana jest charakterystyka ciśnienia złożowego i ciśnienia zatłaczania oraz obliczenia ciśnień panujących w górotworze oraz dla ciśnienia szczelinowania.

W przypadku soli, warstwa przeznaczona na magazyn lub składowisko jest scharakteryzowana głównie pod kątem składu chemicznego oraz właściwości ługowniczych. Poza standardową oceną właściwości geomechanicznych, dla soli istotnym elementem jest charakterystyka jej właściwości reologicznych.

Charakterystyka warstw izolujących jest przedstawiona w analizowanych dokumentacjach na poziomie bardzo ogólnym. Szczelność ewentualnego obiektu podziemnego jest potwierdzona istnieniem naturalnej pułapki i akumulacji gazu pod ciśnieniem oraz badaniami geofizyki wiertniczej (spadek porowatości). Dla obiektów zlokalizowanych w soli podana jest najczęściej krótka wzmianka, że szczegółowe badania dla tej warstwy nie mają uzasadnienia, gdyż dane literaturowe (często bez przywołania jakie) wskazują, że sól jest gwarantem szczelności.

Charakterystyka warstw nadkładu obejmuje standardowe właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe, w przypadku wysadów solnych dużą uwagę przykłada się do wykształcenia czapy gipsowo-anhydrytowej wysadu.

Charakterystyka warstw przypowierzchniowych w kontekście posadowienia obiektów naziemnych sprowadza się do wydzielenia podstawowych warstw geotechnicznych/geologiczno-inżynierskich i ich charakterystyki pod kątem wilgotności, zagęszczenia i konsystencji oraz podania charakterystyki wytrzymałościowej i odkształceniowej, bazując na doświadczeniach własnych lub nomogramach. Często w dokumentacji jest także zawarte odniesienie do dokumentacji geotechnicznych jakie powstaną na późniejszych etapach realizacji inwestycji.

Modelowanie rzadko jest elementem składowym dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Wyniki modelowania (jeżeli było przeprowadzone) stanowią najczęściej osobne opracowanie wykonane przez ośrodki specjalizujące się w modelowaniu struktur geologicznych, zachodzących w nich zmian, a także w przeprowadzaniu różnego typu symulacji. Autorzy dokumentacji sporadycznie powołują się na wyniki modelowania. Wyniki są przywoływane wyłącznie w dokumentacjach dotyczących prowadzenia działalności w strukturach solnych. Są to zazwyczaj:

– ocena stabilności i szczelności komór (dotyczy obiektów wyługowanych w solach) wraz z wariantową analizą zmian zachodzących w górotworze związanych m.in. z:
  • zatłaczaniem gazu (doborem ciśnienia min. i maks., długością cyklu zatłaczania itp.),
  • głębokością posadowienia komory, kształtem komory i ewentualną lokalizacją sąsiednich komór,
  • przyjętymi właściwościami reologicznymi dla soli oraz kryteriami wytężeniowymi;
– prognoza tempa konwergencji górotworu (w ujęciu wpływu na zmniejszenie wielkości komory, a nie w ujęciu wpływu na stateczność).

W przypadku magazynów w wyeksploatowanych złożach węglowodorów, przytaczane są literaturowe dane na temat zmian geomechanicznych zachodzących przy operacjach zatłaczania i odbioru produktów magazynowanych oraz okresów międzyoperacyjnych, wykazując w ten sposób geomechaniczną stabilność układu.

Warunki hydrogeologiczne są analizowane w dwóch ujęciach: ogólnych opisów warunków hydrogeologicznych z charakterystyką poszczególnych poziomów oraz charakterystyki formacji, w której przewiduje się składowanie/magazynowanie.

Ogólna charakterystyka hydrogeologiczna obejmuje najczęściej:

– opis występujących Głównych Zbiorników Wód Podziemnych;
– charakterystykę poziomów wodonośnych (opis i ocena ich chemizmu i jakości);
– opis przejawów wodnych (dotyczy wysadów solnych oraz kopalń).

Charakterystyka formacji przewidzianej do magazynowania lub składowania to:

– granice i wykształcenie litologiczne formacji chłonnej;
– parametry hydrogeologiczne warstwy chłonnej (porowatość efektywna, przepuszczalność, miąższość efektywna, temperatura, wskaźnik nasycenia porów gazem, współczynnik zawodnienia);
– pojemność i zasięg struktury objętej magazynowaniem/składowaniem (w postaci obliczeń matematycznych na podstawie geometrii struktury złożowej, wielkości pierwotnych zasobów złoża i stanu zasobów po zakończeniu eksploatacji oraz warunków ciśnienia i temperatury);
– charakterystyka szczelinowatości skał zbiornikowych (na podstawie materiału rdzeniowego), w tym:
  • pomiary upadu warstw i spękań oraz ich wzajemny stosunek,
  • pomiary liczby szczelin i ich przebiegu w obrębie rdzenia,
  • ocena stopnia wypełnienia szczelin.

Charakterystyka warunków hydrogeologicznych skał otaczających jest najczęściej pomijana, z wyjątkiem wysadów solnych, gdzie są opisywane wszelkie przejawy wodne w czapie wysadu oraz w warstwach nadległych i otaczających wysad.

Dane dotyczące zagrożeń oraz wpływu na środowisko w analizowanych dokumentacjach miały charakter mniej analityczny, a bardziej opisowy. Zagrożenia są zdefiniowane

Tabela 79

Przykład zaleceń dla monitoringu w przypadku magazynowania gazu ziemnego w złożu soli kamiennej

Faza monitoringu	Zakres badań monitoringowych
Przedeksploatacyjna	– określenie pierwotnego stanu środowiska wodnego i gruntowego, tj. chemizmu wód powierzchniowych i podziemnych oraz powietrza glebowego metodami wskaźnikowymi (co miesiąc) oraz metodą rozszerzonych analiz fizykochemicznych: barwa, pH, chlorki, azot amonowy, azot azotanowy III, azot azotanowy V, ChZT, fluorki, magnez, mangan, potas, sód, wapń, żelazo, siarczany, przewodnictwo właściwe, sucha pozostałość, twardość ogólna (co kwartał) – badanie szczelności otworu po zakończeniu prac wiertniczych
Eksploatacyjna	– kontrola warunków panujących w górotworze, w tym: • monitoring ruchów pionowych terenu co 5 lat • pomiary konwergencji • badanie stanu komór • badanie stanu technicznego odwiertów eksploatacyjnych • pomiar kształtu i objętości komór echosondą – min. co 6 lat • pomiar głębokości spągu komory – min. co 6 lat • pomiar temperatury w komorze – min. co 6 lat • kontrola stanu technicznego rur wydobywczych – co 6 lat • przegląd wgłębnych zaworów bezpieczeństwa – co 3 lata – badanie szczelności magazynu na podstawie pomiarów gazu (metanomierz, analizatory węglowodorów – metanu i wyższych od metanu oraz CO_2, O_2 i H_2) w piezometrach przynajmniej po każdym cyklu pracy magazynu: • otwory kontrolne do pomiaru gazu w czapie • sondy monitoringowe do pomiaru gazu w strefie przypowierzchniowej – analizy chromatograficzne próbek wody – wizualna inspekcja części powierzchniowej instalacji
Poeksploatacyjna	– kontrola warunków panujących w górotworze, w tym: • monitorowanie konwergencji (raz na 5 lat) przez pomiar kontrolny echosondą komór magazynowych • monitoring powietrza glebowego i zawartości węglowodorów w odprowadzanej z otworu solance – monitoring szczelności magazynu przynajmniej po każdym cyklu pracy magazynu, oparty na obserwacji w piezometrach i studniach zlokalizowanych w pobliżu na potrzeby wczesnego wykrycia wypływu gazu

Tabela 80

Przykład zaleceń dla monitoringu w przypadku magazynowania gazu ziemnego w złożach węglowodorów

Faza monitoringu	Zakres badań monitoringowych
Przedeksploatacyjna	– stan zerowy w piezometrach i wodach powierzchniowych – ocena powietrza glebowego na obecność: metanu, etanu, propanu, butanu, pentanu, helu, dwutlenku węgla
Eksploatacyjna	– monitoring geochemiczny, przynajmniej po każdym cyklu pracy magazynu, którego celem jest: stwierdzenie zaistnienia niekontrolowanej migracji gazu ziemnego oraz identyfikacja źródeł i dróg tej migracji, w tym: • badania oznaczenia składu powietrza gruntowego lub składu gazu zaadsorbowanego z otworów nawierconych do głębokości kilku metrów • wykorzystanie otworu obserwacyjnego do kontroli migracji gazu – kontrolne pomiary pionowych przemieszczeń terenu w obrębie złoża gazu (dodatkowo)
Poeksploatacyjna	– brak danych

w ujęciu zagrożeń naturalnych (tektonika, sufozja, wstrząsy, zagrożenia hydrogeologiczne itp.) oraz zagrożeń, jakie może wywołać obiekt (rozszczelnienia, wycieki, erupcje itp.), na podstawie danych literaturowych i doświadczenia działających od lat obiektów. Podsumowanie tych danych znajduje się w rozdziale 5 (cz. I). Na ich podstawie określa się możliwy wpływ na środowisko na każdym etapie realizacji inwestycji (w tym także na etapie zamknięcia/likwidacji) w ujęciu wpływu na powierzchnie terenu (przemieszczenia) oraz na atmosferę, glebę, wody podziemne i powierzchniowe oraz klimat akustyczny. Są to informacje zaczerpnięte z opracowań środowiskowych, nie są przedmiotem szczegółowej analizy.

Podsumowaniem zebranych danych geologicznych i technicznych jest sformułowanie zaleceń odnośnie do monitoringu w końcowej części dokumentacji. Zalecenia te najczęściej są opracowywane na podstawie aktów prawnych i danych literaturowych. Na tym etapie wiedzy o obiekcie zalecenia te wydają się wystarczające. Obejmują zarówno określenie pierwotnego stanu środowiska (stan zerowy), jak i kontrolę zmian na etapie budowy, eksploatacji oraz likwidacji, a także wiele lat po zamknięciu obiektu.

Tabela 81

Przykład zaleceń dla monitoringu w przypadku składowania odpadów po wydobyciu ropy naftowej w złożach węglowodorów

Faza monitoringu	Zakres badań monitoringowych
Przedeksploatacyjna	– określenie pierwotnego stanu środowiska wodnego i gruntowego, tj. chemizmu wód powierzchniowych i podziemnych oraz powietrza glebowego – kontrola szczelności otworu operacyjnego
Eksploatacyjna	– monitoring geochemiczny, którego celem jest stwierdzenie zaistnienia niekontrolowanej migracji gazu ziemnego oraz identyfikacja źródeł i dróg tej migracji, zaleca się: • pomiar i rejestrację ilości zatłaczanych odpadów • pomiar i rejestrację ciśnienia zatłaczania • pomiar wskaźnika pH • pomiar zawartości fazy stałej • okresową analizę chemiczną cieczy – badanie substancji i parametrów wskaźnikowych (przynajmniej raz w roku) – kontrola warunków panujących w górotworze, w tym: • konwergencji • wielkości dopływów wód podziemnych do wyrobisk górniczych • poziomu metanonośności • innych wymagań wynikających z koncesji
Poeksploatacyjna	ponad 30 lat po zakończeniu eksploatacji – badanie substancji i parametrów wskaźnikowych wód podziemnych (przynajmniej raz w roku) – kontrola warunków panujących w górotworze, w tym: • konwergencji • wielkości dopływów wód podziemnych do wyrobisk górniczych • poziomu metanonośności • innych wymagań wynikających z koncesji – kontrola geochemiczna powietrza glebowego w rejonie zlikwidowanych odwiertów

Analiza dokumentacji archiwalnych opracowanych dla warunków krajowych pozwoliła wyodrębnić pewne minimum jakie należy wziąć pod uwagę przy konstruowaniu zaleceń do planu monitoringu. Podane przykłady dotoczą wyłącznie polskich warunków i zostały zaczerpnięte z krajowych dokumentacji archiwalnych.

W niektórych przypadkach pojawiają się oceny specyficzne dla danej działalności lub dokumentowanej struktury, m.in.:

– ocena występowania wstrząsów w obrębie analizowanego górotworu;
– ocena stanu technicznego stalowych rur w odwiertach eksploatacyjnych;
– ocena szczelności odwiertów przeznaczonych do zatłaczania i odbioru;
– ocena właściwości ługowniczych soli;
– ocena warunków temperaturowych w górotworze.

Podsumowując, większość z przeanalizowanych dokumentacji archiwalnych z założenia ma charakter uproszczony z uwagi na istniejący wcześniej zakład górniczy, a tym samym dużą dostępność danych archiwalnych zgromadzonych w dokumentacjach złożowych i innych dokumentach górniczych oraz nabyte doświadczenie z czasu eksploatacji obiektu. Dokumentacjami o największej szczegółowości są te dla obiektów planowanych w solach. Wynika to zarówno ze specyfiki obiektu, jak i z faktu, że w większości przypadków są to nowe obiekty (wyługowane kawerny solne) planowane w słabo rozpoznanym terenie (np. planowany magazyn Damasławek).

Nierzadko problemem jest bardzo ogólny opis inwestycji i założeń technicznych (np. brak danych o planowanym do składowania rodzaju odpadu), ponieważ na wczesnym etapie przygotowania inwestycji Inwestor nie zawsze posiada tego typu dane. Bardzo często dopiero na podstawie danych z dokumentacji geologiczno-inżynierskich Inwestor opracowuje założenia techniczne inwestycji.

TERMINOLOGIA[57]

Badania geologiczne – wykonywanie terenowych i laboratoryjnych obserwacji, badań i pomiarów środowiska geologicznego; badania środowiska geologicznego wykonywane na potrzeby dokumentowania geologicznego. Szczególnym przypadkiem badań geologicznych są prace geologiczne, w tym roboty geologiczne.

Badania geologiczno-inżynierskie – wykonywanie terenowych i laboratoryjnych obserwacji, badań i pomiarów środowiska geologiczno-inżynierskiego; badania środowiska geologiczno-inżynierskiego wykonywane na potrzeby dokumentowania geologiczno-inżynierskiego. Szczególnym przypadkiem badań geologiczno-inżynierskich są prace geologiczne, w tym roboty geologiczne (Wytyczne…, 2019 zmienione).

Budowa geologiczna – charakterystyczne cechy struktury przeznaczonej na obiekt podziemny oraz otaczającego górotworu, w tym m.in. sposób ułożenia i następstwo występowania skał i gruntów, ich litologiczno-petrograficzny charakter, wiek, geneza, a także szczelność geologiczna struktury oraz czynniki geodynamiczne, w tym tektonika i aktywność sejsmiczna (na podstawie Bażyński, Turek, 1969 zmienione; Jaroszewski i in., 1985 zmienione).

Charakterystyka lokalizacji (ang. *site characterisation*) – ocena potencjalnych lokalizacji obiektu i wybór przynajmniej jednej spełniającej wszystkie kryteria lokalizacyjne, dla której będą prowadzone dalsze prace projektowe i działania prowadzące do uzyskania pozwolenia na budowę. Na tym etapie wykorzystuje się na wszelkie istniejące dane i pozyskuje się nowe z wielu dziedzin geologii. Etap ten dzieli się często na dwa – charakterystykę wstępną i szczegółową. W warunkach polskich charakterystykę przeprowadza się już na jednej wybranej lokalizacji (Best Practices, 2017 zmienione).

Chłonność – możliwość przyjęcia określonej ilości substancji/odpadu w określonym czasie (Uliasz-Misiak, 2009).

Czynniki i kryteria nieobligatoryjne – czynniki i kryteria ustalane przez Inwestora w celu oceny i wyboru optymalnej lokalizacji obiektu podziemnego.

Czynniki i kryteria obligatoryjne – czynniki i kryteria wynikające z przepisów prawa oraz decyzji administracyjnych, wykluczające wybór lokalizacji obiektu podziemnego.

Czynniki lokalizacji obiektów podziemnych – specyficzne uwarunkowania i cechy lokalizacji oraz jej otoczenia wykorzystywane do jej charakterystyki (syn. czynniki wyboru lokalizacji).

Dokument elektroniczny – stanowiący odrębną całość znaczeniową, zbiór danych uporządkowanych w określonej strukturze wewnętrznej i zapisany na informatycznym nośniku danych (ustawa o informatyzacji).

Dokumentacja geologiczno-inżynierska sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji (DGI-PMS) lub podziemnego składowania odpadów (DGI-PSO) – dokument (opracowanie geologiczne), który przedstawia wyniki prac geologicznych wraz z ich interpretacją, określeniem stopnia osiągnięcia zamierzonego celu wraz z uzasadnieniem, a w szczególności określa budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne badanej przestrzeni przeznaczonej do magazynowania lub składowania oraz określa przydatność badanego terenu do realizacji zamierzonego przedsięwzięcia (Majer, Sokołowska, 2021 zmienione).

Dokumentacja geologiczno-inżynierska sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla (DGI-CO_2) – dokument (opracowanie geologiczne), który przedstawia wyniki prac geologicznych wraz z ich interpretacją, określeniem stopnia osiągnięcia zamierzonego celu wraz z uzasadnieniem, a w szczególności określa budowę geologiczną, warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne badanej przestrzeni przeznaczonej do składowania dwutlenku węgla oraz określa przydatność badanego terenu do realizacji zamierzonego przedsięwzięcia (Majer, Sokołowska, 2021 zmienione).

Foliacja – kierunkowe rozmieszczenie składników mineralnych w każdym rodzaju skały, zwłaszcza struktura

[57] Definicje terminów stosowanych w poradniku zostały opracowane przez autorów lub na podstawie pozycji literaturowych i dostosowane do celu poradnika.

równoległa, wywołane spłaszczeniem, segregacją lub innymi procesami, którym podlegały ziarna w skałach metamorficznych. Uwaga: oryginalna foliacja może zostać zakłócona przez fałdowanie lub uskoki podczas procesów tektonicznych (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Formacja geologiczna – podstawowe wydzielenie litostratygraficzne, w ramach którego można wyodrębnić warstwy skał i przedstawić je na mapie (ustawa pgg).

Formacje skalne słaboprzepuszczalne – naturalnie występujące warstwy skał mające miąższość, rozciągłość, ciągłość, jednorodność oraz właściwości izolacyjne niezbędne do uszczelnienia obiektu podziemnego. Za potencjalne formacje skalne słaboprzepuszczalne uznaje się formacje krystaliczne, ilaste i solne; formacja geologiczna stanowiąca naturalną barierę geologiczną (ustawa pgg zmienione).

Formacje wodonośne – rozległe, izolowane warstwy wodonośne (ang. *aquifers*), głównie solankowe. Utworzenie w nich magazynu wymaga udokumentowania i rozpoznania wykonanego kosztownymi pracami geologicznymi na podstawie analiz archiwalnych i otworów wiertniczych.

Formacje złóż węgla kamiennego – pokłady węgla kamiennego, w których można zlokalizować obiekt podziemny, zarówno poprzez wykorzystanie pustek poeksploatacyjnych, jak i zatłaczając substancję lub odpad do ich przestrzeni porowych (np. składowanie dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia metanu – CO_2-ECBMR – ang. *enhanced coalbed methane recovery*); termin ten należy rozumieć jako „formacje skalne zawierające złoża węgla kamiennego" lub też „złoża węgla kamiennego".

Formacje złóż węglowodorów – struktury pułapkowe, w których występują złoża ropy i/lub gazu. Można w nich zlokalizować obiekt podziemny zarówno po wyeksploatowaniu złoża, jak i w formie wspomagania wydobycia – EOR – ang. *enhanced oil recovery*, EGR – ang. *enhanced gas recovery*; należy rozumieć jako „formacje skalne zawierające złoża węglowodorów" lub też „złoża węglowodorów".

Granica pomiędzy częściami podziemną a naziemną – najczęściej głowica otworu eksploatacyjnego lub wyjście szybu kopalnianego.

Grunt – zbiór minerałów, które można zdezintegrować w wodzie za pomocą dłoni (PN-EN ISO 14688-1:2018-5).

Informatyczny nośnik danych – materiał lub urządzenie służące do zapisywania, przechowywania i odczytywania danych w postaci cyfrowej (ustawa o informatyzacji).

Karotaż wiertniczy – profilowanie otworu metodami geofizycznymi.

Kolmatacja – wprowadzanie i osadzanie się w przestrzeni porowej gruntu/skały drobnych cząstek stałych unoszonych przez wody podziemne lub infiltracyjne (Liszkowski, 1971); uszczelnianie przepuszczalnego gruntu/skały przez filtrującą wodę zawierającą zawiesinę ilastą, pylastą lub inną. Kolmatacja może być naturalna lub sztuczna (Bażyński, Turek, 1969 zmienione).

Kompleks podziemnego składowania dwutlenku węgla – podziemne składowisko dwutlenku węgla i otaczające je formacje geologiczne, które mogą mieć wpływ na stabilność i bezpieczeństwo podziemnego składowania dwutlenku węgla (ustawa pgg).

Konwergencja – powolne i stopniowe samozaciskanie się wyrobisk (Kunstman i in., 2002); zmiana wymiarów pustki w wyniku jej zaciskania (Kortas, 2001); miara procesu zaciskania wyrobisk górniczych (Kortas, 2004; Maj, 2009; Marczak, 2010). Konwergencja może być liniowa k (w jednostkach długości), powierzchniowa k_s (w jednostkach pola powierzchni) i objętościowa k_v (w jednostkach objętości) i jest to konwergencja bezwzględna. Konwergencja bezwzględna podzielona odpowiednio przez jednostkę długości, pola powierzchni lub objętości, to konwergencja względna, wyrażana w promilach. Prędkość konwergencji względnej to wartość konwergencji względnej podzielona przez czas, zazwyczaj rok. Prędkość konwergencji liniowej bezwzględnej jest przedstawiana w milimetrach na rok (Kortas, 2001; Maj, 2009; Marczak, 2010; Gogolewska, Markowiak, 2017).

Kryteria oceny lokalizacji obiektu podziemnego (syn. kryteria lokalizacji, kryteria wyboru lokalizacji) – miara czynników lokalizacji; ustalone wskaźniki/parametry, opisujące w sposób ilościowy lub jakościowy wytypowane do oceny cechy lokalizacji, tak żeby możliwe było porównywanie lokalizacji oraz wybór optymalnej.

Lokalizacja obiektu podziemnego (lokalizacja) – część przestrzeni podziemnej i naziemnej, w której jest lub będzie umiejscowiony podziemny magazyn lub składowisko.

Masyw skalny – skała składająca się z nienaruszonego materiału skalnego wraz z nieciągłościami i strefami wietrzenia (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Materiał skalny – nienaruszona skała między nieciągłościami (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Metadane – zestaw logicznie powiązanych z dokumentem elektronicznym informacji, opisujących ten dokument (Rozporządzenie..., 2006).

Model – uproszczona reprezentacja układu złożonego z obiektu podziemnego i jego otoczenia w postaci algorytmów oddających fizyczną charakterystykę zachodzących procesów.

Model dynamiczny – model, który przedstawia ewolucję jakiegoś obiektu lub zjawiska w czasie. Przykładem modelu dynamicznego jest symulacja procesu zatłaczania substancji/odpadów do podziemnego zbiornika i jego wpływu na zmianę ciśnienia i temperatury, czy procesu zaciskania kawern.

Model dynamiczny podstawowy – model dynamiczny wykonywany w celu wyboru optymalnej lokalizacji lub dla uzyskania koncesji.

Model dynamiczny złożony – model dynamiczny wykonywany na użytek operatora i mający jak najdokładniej przewidywać wszelkie aspekty funkcjonowania (pracy) obiektu.

Model koncepcyjny (fizyczny) – model, który w uproszczony sposób przedstawia badany układ złożony z obiektu podziemnego i jego otoczenia oraz uwzględnia jego najważniejsze cechy i zależności.

Model matematyczny – model, który w formie równań matematycznych opisuje badany proces czy zjawisko.

Model numeryczny (model obliczeniowy) – model, w którym określa się, w jaki sposób będą programowane i wykonywane obliczenia w zależności od przyjętej metody numerycznej.

Model statyczny – model przedstawiający obiekt, którego badane parametry nie ulegają zmianie w czasie (kiedy model osiągnął stan równowagi). Przykładami takiego modelu statycznego mogą być: model strukturalny, model termiczny górotworu, model naprężeń tektonicznych w górotworze.

Modelowanie numeryczne – szukanie przybliżonych rozwiązań dla określonych, matematycznie sformułowanych problemów przy użyciu komputerów; opracowanie modelu górotworu, który będzie stanowić uproszczony obraz ośrodka geologicznego, obiektu podziemnego i jego otoczenia w formie algorytmów umożliwiających fizyczną charakterystykę zachodzących w nim procesów.

Nieciągłość – powierzchnia oddzielności w masywie skalnym, otwarta lub zamknięta, która może być rozwarta w wyniku wzrostu lub zmniejszenia naprężenia wywołanego pracami inżynierskimi (PN-EN ISO 14689:2018-5). Przykład: warstwowanie, cios, szczelina, kliważ, uskok.

Obiekt budowlany (część naziemna, obiekt naziemny) – budynek, budowla lub obiekt małej architektury, wraz z instalacjami zapewniającymi możliwość użytkowania obiektu zgodnie z jego przeznaczeniem, wzniesiony z użyciem wyrobów budowlanych (ustawa Prawo budowlane). W przypadku podziemnego magazynu lub podziemnego składowiska, to część naziemna inwestycji stanowiąca całość techniczno-użytkową wraz z instalacjami i urządzeniami technicznymi.

Obiekt budowlany zakładu górniczego – znajdujący się poza podziemnym wyrobiskiem górniczym obiekt zakładu górniczego, będący obiektem budowlanym w rozumieniu ustawy Prawo budowlane, służący bezpośrednio do wykonywania działalności regulowanej ustawą w zakresie: a) wydobywania kopalin ze złóż, a w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny wraz z pozostającym w związku technologicznym z wydobyciem kopaliny przygotowaniem wydobytej kopaliny do sprzedaży, albo b) podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, albo c) podziemnego składowania odpadów, albo d) podziemnego składowania dwutlenku węgla (ustawa pgg).

Obiekt podziemny (część podziemna, składowisko/magazyn) – strefa górotworu przekształcona przez człowieka w celu jego eksploatacji, wraz z instalacjami zapewniającymi możliwość jego funkcjonowania zgodnie z przeznaczeniem. W przypadku podziemnego magazynu lub podziemnego składowiska jest to część podziemna inwestycji; wyrobisko górnicze, tj. przestrzeń w nieruchomości gruntowej lub górotworze powstała w wyniku robót górniczych (ustawa pgg); rodzaje obiektów podziemnych: podziemny bezzbiornikowy magazyn substancji, podziemne składowisko odpadów, podziemne składowisko dwutlenku węgla.

Objętościowy wskaźnik spękań *Jv* [liczba spękań/m^3] – liczba nieciągłości (spękań) w 1 m^3 masywu skalnego, gdzie $Jv = 1/S1 + 1/S2 + 1/S3$,. S1, S2, S3 – odstępy (w metrach) każdego z zestawów nieciągłości w danej lokalizacji.

Obszar górniczy – przestrzeń, w granicach której przedsiębiorca jest uprawniony do wydobywania kopaliny, podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów, podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz prowadzenia robót górniczych niezbędnych do wykonywania koncesji (ustawa pgg).

Ocena możliwości wykonania projektowanego obiektu podziemnego – sprawdzenie, które kryteria lokalizacji obiektu podziemnego zostały spełnione, a które nie, na podstawie opisanych czynników lokalizacji.

Ocena warunków geologiczno-inżynierskich – określenie złożoności warunków geologiczno-inżynierskich w podziale na część naziemną i część podziemną wraz z prognozą zmian w wyniku realizacji obiektu podziemnego (Wytyczne…, 2019 zmienione).

Odpad – każde medium, którego posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do którego pozbycia się jest obowiązany (ustawa o odpadach, zmienione).

Odpad przemysłowy – odpady powstające w wyniku działalności gospodarczej obejmującej procesy produkcji przemysłowej, z wyłączeniem odpadów niezawierających odpadów niebezpiecznych, które ze względu na swój charakter i skład są podobne do odpadów z gospodarstw domowych (Projekt ustawy o wielkoobszarowych terenach zdegradowanych, nr UD312).

Odpad przeróbczy – grupa odpadów wydobywczych, które powstają w wyniku przeróbki wydobytych kopalin przy wykorzystaniu procesów mechanicznych, fizycznych, biologicznych, termicznych lub chemicznych oraz z połączenia tych procesów (ustawa o odpadach wydobywczych).

Odpad wydobywczy – odpady powstające w procesach poszukiwania, rozpoznawania, wydobywania i udostępniania kopalin ze złóż (ustawa o odpadach wydobywczych).

Odzysk – rozumie się przez to jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, żeby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce (ustawa o odpadach).

Pęcznienie – zdolność (proces) zwiększania objętości gruntu/skały po zalaniu go wodą. Zdolność pęcznienia w ujęciu ilościowym określa wskaźnik pęcznienia (Bażyński, Turek, 1969 zmienione).

Plan działań naprawczych – dokument określający działania naprawcze mające na celu uniemożliwienie powstania zagrożenia zdrowia i życia ludzi oraz środowiska, w tym wód podziemnych (ustawa pgg).

Plan monitoringu – dokument zawierający opis monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla prowadzonego w trakcie funkcjonowania/eksploatacji (w tym przed i w trakcie zatłaczania CO_2), na etapie likwidacji i po zamknięciu składowiska, jest załącznikiem do planu zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla (ustawa pgg).

Plan ruchu zakładu górniczego – dokument określający strukturę organizacyjną zakładu, granice obszaru górniczego, a także szczegółowe przedsięwzięcia niezbędne w celu zapewnienia: wykonywania działalności objętej koncesją, bezpieczeństwa powszechnego, bezpieczeństwa pożarowego, bezpieczeństwa osób przebywających w zakładzie górniczym (w tym bhp), racjonalnej gospodarki górotworem, ochrony elementów środowiska, ochrony obiektów budowlanych, zapobiegania konfliktom interesów (poszukiwanie i rozpoznawanie zasobów naturalnych w obrębie obszaru górniczego, sąsiednie obszary górnicze), zapobiegania szkodom i ich naprawy (ustawa pgg).

Plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla – dokument wynikający z ustawy pgg sporządzany na podstawie dokumentacji geologicznej, z uwzględnieniem wymagań w zakresie gospodarowania podziemnym składowiskiem dwutlenku węgla, szczegółowej charakterystyki warunków technicznych i ekonomicznych związanych z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla oraz oceny ryzyka podziemnego składowania dwutlenku węgla. Podlega zatwierdzeniu w drodze decyzji, przez właściwy organ nadzoru górniczego. Szczegółową zawartość określa Rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla (ustawa pgg).

Podłoże budowlane (podłoże gruntowe) – strefa skał i gruntów naturalnych lub antropogenicznych, współpracująca z obiektem budowlanym, w której właściwości gruntów i skał mają wpływ na projektowanie, wykonywanie i eksploatowanie obiektów budowlanych (Majer i in., 2018).

Podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji – okresowe przechowywanie substancji bezpośrednio w górotworze celem jej gromadzenia z zamiarem późniejszego wykorzystania (w treści poradnika zwane w skrócie magazynowaniem lub podziemnym magazynowaniem).

Podziemne składowanie odpadów – trwałe lokowanie w górotworze odpadów lub dwutlenku węgla, które nie zostały zagospodarowane w inny sposób (w treści poradnika zwane w skrócie składowaniem lub podziemnym składowaniem).

Podziemne składowisko dwutlenku węgla – część górotworu (przestrzeni podziemnej) o określonej pojemności wykorzystywana w celu trwałego przechowywania dwutlenku węgla, połączona z powierzchniową instalacją zatłaczającą (ustawa pgg).

Podziemne składowisko odpadów – część górotworu (przestrzeni podziemnej), w tym podziemne wyrobisko górnicze, wykorzystywana w celu unieszkodliwiania odpadów przez ich składowanie (ustawa pgg); Dyrektywa RE z 1999 definiuje pojęcie podziemnego składowiska odpadów jako stałe miejsce składowania odpadów w głębokiej pustce/kawernie geologicznej (poeksploatacyjnej) takiej jak np. kopalnia soli lub potasu.

Podziemny magazyn substancji – część górotworu (przestrzeni podziemnej) wykorzystana na potrzeby przechowywania substancji (zazwyczaj gazowej lub płynnej) w naturalnym środowisku na znacznej głębokości rzędu kilkuset i więcej metrów (Gąska i in. 2012; Reinisch, 2000).

Pojemność – ilość substancji/odpadu jaką można umieścić w rozpatrywanej strukturze geologicznej (Uliasz-Misiak, 2009).

Procesy i zjawiska antropogeniczne – procesy i zjawiska powodujące zmiany powierzchni Ziemi, jak i jej wnętrza, wywołane przez czynniki antropogeniczne w związku z prowadzoną działalnością człowieka (Majer i in., 2018; Wytyczne…, 2019).

Procesy i zjawiska geologiczne – procesy i zjawiska powodujące zmiany powierzchni Ziemi, jak i jej wnętrza, wywołane przez czynniki naturalne (Majer i in., 2018; Wytyczne…, 2019).

Projekt robót geologicznych (PRG) – dokument (opracowanie geologiczne), który stanowi podstawę wykonania prac i robót geologicznych. Zawiera cel zamierzonych robót geologicznych, sposób jego osiągnięcia, rodzaj dokumentacji geologicznej, która powstanie w efekcie wykonania robót, harmonogram robót, przestrzeń objętą robotami oraz przed-

sięwzięcia konieczne z uwagi na ochronę środowiska (Majer i in., 2018; Majer, Sokołowska, 2021).

Przegląd lokalizacji (ang. *site screening*) – ocena regionów geograficznych lub basenów sedymentacyjnych pod kątem możliwości zlokalizowania obiektu podziemnego i wskazanie obszarów perspektywicznych do kolejnego etapu. Wykorzystuje się tu wszelkie dostępne dane (techniczne i nietechniczne), a badania są ograniczone do minimum lub nie wykonuje się ich wcale. W warunkach polskich przegląd struktur jest najczęściej przedmiotem opracowań regionalnych i projektów badawczych wykonywanych na zlecenie organów państwowych lub opracowywanych w ramach zadań państwowej służby geologicznej (Best Practices, 2017 zmienione).

Przydatność badanego terenu do realizacji obiektu podziemnego – ocena czynników i kryteriów lokalizacji obiektu podziemnego na potrzeby wyboru lokalizacji optymalnej i realizacji obiektu podziemnego.

Rodzaj skały – naturalne nagromadzenie jednego lub więcej minerałów czy też fragmentów skał określone na podstawie ich składu petrograficznego, przeważającego wymiaru ziarna, struktury, tekstury i genezy. Uwaga: typowe przykłady skał podano w tabeli 40 (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Skała – naturalnie występujące nagromadzenie lub zbiór ziaren mineralnych, kryształów lub cząstek mineralnych zagęszczonych, scementowanych lub w inny sposób powiązanych ze sobą, których nie można zdezintegrować w wodzie za pomocą rąk. Uwaga: skała ma ogólnie większą wytrzymałość niż grunt (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Spoiwo – masa materiału skalnego, w której tkwią większe kryształy, ziarna mineralne lub okruchy skał (PN-EN ISO 14689:2018-5). Masa wypełniająca może mieć charakter drobnoziarnisty, szklisty lub amorficzny.

Struktura geologiczna do podziemnego składowania lub magazynowania (zwana dalej strukturą) – udokumentowany element przestrzeni podziemnej, w którym ze względu na budowę geologiczną jest możliwe magazynowanie lub składowanie substancji albo odpadów. Może być zagospodarowana przez zatłaczanie substancji lub odpadu bezpośrednio do wybranej formacji/warstwy, czy też przez wykonanie w niej wyrobisk górniczych; strukturą geologiczną do podziemnego magazynowania lub składowania jest charakterystyczny element budowy geologicznej, w którym skały zalegają w sposób umożliwiający magazynowanie albo składowanie substancji lub odpadu.

Struktura skały – układ warstw, fałdów, uskoków i nieciągłości w masywie skalnym, które dzielą masyw na poszczególne fragmenty lub bloki skalne (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Substancja – medium występujące w przyrodzie lub uzyskane za pomocą procesu produkcyjnego wraz z wszelkimi dodatkami wymaganymi do zachowania jego trwałości oraz wszelkimi zanieczyszczeniami powstałymi w procesie produkcyjnym, lokowane w przestrzeni podziemnej (ustawa o substancjach chemicznych i ich mieszaninach, 2011 zmienione).

Substancja jednoskładnikowa – substancja, w której jeden główny składnik stanowi 80% wagowych substancji (Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów).

Substancja wieloskładnikowa – substancja, w której więcej niż jeden główny składnik jest obecny w stężeniu ≥ 10% wagowych i ≤ 80% wagowych (Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów).

Sufozja (wypłukiwanie gruntu) – zjawisko wypłukiwania drobnych cząstek gruntu przez przepływającą wodę gruntową (Bażyński, Turek, 1969).

System GIS (*Geographical / Geospatial Information System* – system informacji geograficznej / przestrzennej) – zestaw metod i narzędzi usprawniających i umożliwiających pozyskiwanie, gromadzenie, przetwarzanie, analizowanie, wizualizację i udostępnianie danych umiejscowionych w przestrzeni geograficznej (Wytyczne…, 2019 zmienione).

System nieciągłości – układ nieciągłości dzielących masyw skalny na poszczególne bloki skalne (PN-EN ISO 14689-1:2006; brak definicji w normie PN-EN ISO 14689:2018-5).

Szczelność geologiczna obiektu podziemnego – naturalna zdolność struktury geologicznej do zatrzymania substancji/odpadu w strukturze, bez znaczących ubytków poza jej obszar w trakcie zatłaczania, jak i po zatłaczaniu (Tarkowski, Stopa, 2007 zmienione).

Szczelność techniczna obiektu podziemnego – szeroko pojęta szczelność urządzeń technicznych związanych z instalacją zatłaczania substancji/odpadu (otworów, głowic eksploatacyjnych, rurociągów, gazociągów, zamontowanych urządzeń napowierzchniowych itp.) (Tarkowski, Stopa, 2007 zmienione).

Środowisko geologiczne (górotwór, ośrodek geologiczny) – obejmuje skorupę ziemską wraz z wpływającymi na nią czynnikami atmo-, hydro-, i biosfery oraz czynnikami wewnętrznymi i antropogenicznymi (Kowalski, 1988 zmienione).

Środowisko geologiczno-inżynierskie (ośrodek geologiczno-inżynierski) – część środowiska geologicznego, która może się zmienić lub zmienia się pod wpływem obiektu budowlanego/obiektu podziemnego, i jednocześnie wpływa na obiekt budowlany/obiekt podziemny (Majer i in., 2018 zmienione).

Tekstura – rozmiar, kształt i ułożenie ziaren lub kryształów tworzących skałę (PN-EN ISO 14689:2018-5).

Teren badań – obszar objęty pracami geologicznymi, na którym są wykonywane badania geologiczno-inżynierskie.

Teren górniczy – przestrzeń objęta przewidywanymi szkodliwymi wpływami robót górniczych zakładu górniczego (ustawa pgg).

Unieszkodliwianie odpadów – rozumie się przez to proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii (ustawa o odpadach).

Warstwa uszczelniająca (warstwa izolacyjna, naturalna bariera geologiczna, uszczelnienie) – naturalnie występujące warstwy skał mające miąższość, rozciągłość, ciągłość, jednorodność oraz właściwości izolacyjne niezbędne do uszczelnienia obiektu podziemnego. Za potencjalne formacje skalne słaboprzepuszczalne uznaje się formacje krystaliczne, ilaste i solne; formacja geologiczna stanowiąca naturalną barierę geologiczną (ustawa pgg); uszczelnienie pokładowe (ang. *caprock*), zwykle od góry, lub oboczne np. na uskoku (ang. *fault seal*), ograniczające migrację płynów i propagowanie się ciśnień porowych, może prowadzić do powstania komórek ciśnień w obrębie kolektora (ang. *compartmentalization*).

Warstwa zbiornikowa (warstwa chłonna, kolektor, zbiornik, skały zbiornikowe, skały kolektorskie) (ang. *reservoir*) – formacja geologiczna przeznaczona do podziemnego bezzbiornikowego magazynowania lub składowania. Do magazynowania/składowania wykorzystuje się przestrzeń porową formacji lub naturalnie/sztucznie wytworzoną przestrzeń w górotworze.

Warunki geologiczno-inżynierskie w przypadku części naziemnej – cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na posadowienie obiektów budowlanych na powierzchni. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie, należy wziąć pod uwagę geomorfologię, budowę geologiczną w tym tektonikę, sposobu i charakteru wykształcenia gruntów i skał, ich cechy fizyczno-mechaniczne, występowanie i charakter wód podziemnych oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne (Jakubicz, Łozińska, 1989, zmienione).

Warunki geologiczno-inżynierskie w przypadku części podziemnej – cechy środowiska geologiczno-inżynierskiego istotne ze względu na zagospodarowanie przestrzeni podziemnej (strefy górotworu) przeznaczonej na obiekt podziemny. Ustalając warunki geologiczno-inżynierskie dla części podziemnej, należy wziąć pod uwagę budowę geologiczną, w tym czynniki strukturalne i geodynamiczne, warunki hydrogeologiczne oraz procesy i zjawiska geologiczne oraz antropogeniczne występujące lub mogące wystąpić w górotworze.

Warunki geomorfologiczne – zespół cech charakteryzujących formy ukształtowania powierzchni terenu oraz intensywność rzeźby w nawiązaniu do budowy geologicznej (Bażyński, Turek, 1969).

Warunki hydrogeologiczne – cechy charakteryzujące wody podziemne i środowisko ich występowania (Bażyński, Turek, 1969).

Właściwości fizyczno-mechaniczne – cechy chemiczne, fizyczne, mechaniczne gruntów i skał, określane różnymi metodami, wykorzystywane do charakterystyki górotworu (Wytyczne…, 2019 zmienione).

Właściwości izolacyjne – cechy skał, które powodują, że formacje skalne z nich zbudowane są słaboprzepuszczalne, tj. uśredniony maksymalny współczynnik wodoprzepuszczalności dla całej formacji skalnej wynosi $k_{fs} < 10^{-8}$ m/s (dla wody).

Wskaźnik jakości rdzenia – ilościowa ocena stanu rdzenia na podstawie wyglądu rdzenia.

Wybór lokalizacji (ang. s*ite selection*) – ocena wybranych obszarów perspektywicznych pod kątem możliwości realizacji obiektu podziemnego i wskazanie potencjalnych miejsc jego budowy w obrębie obszaru perspektywicznego z uwzględnieniem kryteriów lokalizacyjnych. Wykorzystuje się tu wszelkie dostępne dane i wykonuje wstępne badania geologiczne (jeśli brak) na potrzeby zidentyfikowania tych miejsc. W warunkach polskich wybór lokalizacji wynika z analiz ekonomicznych i technicznych Inwestora z uwzględnieniem czynników ekonomicznych, środowiskowych, społecznych i technologicznych (Best Practices, 2017 zmienione).

Wyciek dwutlenku węgla – każde wydostanie się dwutlenku węgla poza podziemne składowisko dwutlenku węgla (ustawa pgg).

Zagospodarowana przestrzeń podziemna – strefa górotworu obejmująca obiekt podziemny oraz strefę wzajemnego oddziaływania obiektu podziemnego i górotworu.

Zakład górniczy – wyodrębniony technicznie i organizacyjnie zespół środków służących bezpośrednio do wykonywania działalności regulowanej ustawą w zakresie wydobywania kopalin ze złóż, a w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny wraz z pozostającym w związku technologicznym z wydobyciem kopaliny, przygotowaniem wydobytej kopaliny do sprzedaży, podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji, podziemnego składowania odpadów lub podziemnego składowania dwutlenku węgla, w tym wyrobiska górnicze, obiekty budowlane, urządzenia oraz instalacje (ustawa pgg).

Zamknięcie podziemnego składowiska dwutlenku węgla – trwałe zaprzestanie zatłaczania dwutlenku węgla do podziemnego składowiska dwutlenku węgla (ustawa pgg).

SKRÓTY I SYMBOLE

W tabeli 82 zawarto spis skrótów i symboli wykorzystanych w poradniku. Spis ten dotyczy różnych nauk i ich dziedzin, co powoduje, że te same skróty i symbole mogą mieć różne znaczenie.

Tabela 82

Spis skrótów i symboli

Symbol / skrót	Jednostka	Nazwa
1	**2**	**3**
%pc	%	procentowa zawartość piaskowca
$\sum a$	cu	makroskopowy przekrój czynny absorpcji neutronów
$\sum L_k$	m	suma długości wszystkich kawałków rdzenia wiertniczego pomiędzy naturalnymi spękaniami, przy czym długość każdego kawałka rdzenia, mierzona wzdłuż osi rdzenia, musi być dłuższa od podwójnej średnicy rdzenia (Deere, 1968 za Deere, 1989)
1D	–	wizualizacja w przestrzeni jednowymiarowej; wymiarowości badanego ośrodka
2D	–	wizualizacja w przestrzeni dwuwymiarowej; wymiarowości badanego ośrodka
3D	–	wizualizacja w przestrzeni trójwymiarowej; wymiarowości badanego ośrodka
4D	–	wizualizacja w przestrzeni czterowymiarowej; wymiarowości badanego ośrodka
A	–	elektroda prądowa (ang. C1) (badania elektrooporowe)
A	–	kategoria pobierania próbek skał (wiercenia)
A	–	współczynnik anizotropii: akustycznej, wytrzymałości
a	g	naważka próbki użyta do badań zawartości węglanów za pomocą aparatu Scheiblera
A	m^2	pole powierzchni próbki zanurzonej w wodzie (badanie nasiąkliwości)
A	m^2	przekrój poprzeczny przepływu (badanie przepuszczalności)
A	mm^2	pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki (badanie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, badanie pęcznienia, test punktowego obciążenia)
A	mm^2	pole wymuszonej powierzchni ścinania (badanie wytrzymałości na ścinanie)
A, M, N, A1, A2, M1, N1	–	oznaczenie elektrod pomiarowych w badaniach elektrooporowych
A_b (n_w)	%	nasiąkliwość wagowa
AE	–	emisja akustyczna
AIT	–	sonda indukcyjna do badań geofizycznych otworowych (ang. *array induction tool*)
APCL	ułamek	poprawiona porowatość neutronowa w jednostkach wapienia sondą APS do badań geofizycznych otworowych
APS	–	sonda do badań geofizycznych otworowych mierząca jednocześnie porowatość neutronową i parametr $\sum a$ [cu] (ang. *accelerator porosity sonde*)
ASTM	–	*American Society for Testing and Materials*
ATES	–	magazyn energii cieplnej w warstwie wodonośnej (magazyn otwarty) (ang. *aquifer thermal energy storage*)

Tabela 82 cd.

1	2	3
ATi	–	wskaźniki proweniencji (symbol zależy od rodzaju minerałów wykorzystywanych do analizy)
AVAZ	–	analiza zmiany amplitudy sygnału sejsmicznego z kątem i azymutem (ang. *amplitude versus angle and azimuth*)
AVO	–	analiza zmian zapisu sejsmicznego z offsetem (badania geofizyczne sejsmiczne)
B	–	butan techniczny
B	–	elektroda prądowa (ang. C2)
B	–	kategoria pobierania próbek skał (wiercenia)
B	–	skały odkształcające się bardzo krucho (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)
BDG		Baza Danych Geomechanicznych
BDGI	–	Baza Danych Geologiczno-Inżynierskich
BDGI-WFM	–	Baza Danych Właściwości Fizycznych i Mechanicznych
BDGN	–	Baza Danych o Geotermii Niskotemperaturowej
BDOT10k	–	Baza Danych Obiektów Topograficznych
BSM	mm	średnica nominalna otworu (badania geofizyczne otworowe)
BTES	–	otworowy magazyn energii cieplnej (ang. *borehole thermal energy storage*)
BWM	–	Baza Wód Mineralnych
C	–	kategoria pobierania próbek skał (wiercenia)
c	–	stała liczbowa zależna od rodzaju użytych jednostek
C	–	wskaźnik korygujący do średnicy 50 mm (badanie wytrzymałości pod obciążeniem punktowym)
C	J/K	pojemność cieplna
c	kPa	spójność
c'	kPa	spójność efektywna
c'_R	kPa	rezydualna spójność efektywna
CAD	–	format danych
CAG	–	nazwa firmy produkującej aparaturę geofizyczną do pomiarów otworowych
CALI	cal	średnica otworu (badania geofizyczne otworowe)
CASE	–	magazyn sprężonego powietrza (ang. *compressed air energy storage*)
C_{bc}	1/Pa	zmiana objętości skały ρ_b pod wpływem ciśnienia nadkładu P_c przy stałym ciśnieniu porowym P_p
CBDH	–	Centralna Baza Danych Hydrogeologicznych
C_{bp}	1/Pa	zmiana w objętości związana ze zmianą ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu uszczelnienia
CCS	–	wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla; sekwestracja dwutlenku węgla (ang. *carbon capture and storage*)
CCU	–	wychwytywanie i wykorzystanie dwutlenku węgla (ang. *carbon capture utilization*)
C_g	1/Pa	ściśliwość gazu
CH, CH-P, CH-S	–	międzyotworowe prześwietlania sejsmiczne CH, fali P, fali S (ang. *crosshole*)
ChZT	mg/dm^3	chemiczne zapotrzebowanie tlenu
CLUS	–	wydzielone jednorodne litologicznie warstwy – jednostki (ang. *consistent lithological units*)
C_o	1/Pa	ściśliwość ropy
CO_2; CO2	–	dwutlenek węgla
CO2-ECBMR	–	składowanie dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia metanu (ang. *enhanced coalbed methane recovery*)

Tabela 82 cd.

1	2	3
C_p	1/Pa	ściśliwość formacji złożowej
C_{pc}	1/Pa	zmiana w objętości porowej V_p wywołaną zmianą ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym
C_{pp}	1/Pa	zmiana w objętości porowej wraz ze zmianą ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu
CPTU	–	sondowania statyczne
CQI		wskaźnik jakości rdzenia (ang. *core quality index*); ilościowa ocena stanu rdzenia na podstawie wyglądu rdzenia
C_t, β	1/Pa	ściśliwość
CTES	–	magazyn energii cieplnej w kawernach (ang. *cavity thermal energy storage*)
C_w	1/Pa	ściśliwość wody
CZi	–	wskaźniki proweniencji (symbol zależy od rodzaju minerałów wykorzystywanych do analizy)
D	–	kategoria pobierania próbek skał (wiercenia)
D	–	skały odkształcające się ciągliwie bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)
D	m	średnica ługowanej komory solnej (kawerny)
D	m	średnica próbki walcowej
d	m	średnica tłoka
d	nm	odległość między płaszczyznowa
D^2	mm^2	kwadrat średnicy próbki walcowej
D_e	mm	odległość pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie
D_e^2	mm^2	kwadrat odległości pomiędzy stożkowymi głowicami dociskowymi na prasie
DEM	–	metoda elementów dyskretnych (ang. *discrete element method*)
DFN	–	rozkład szczelin w obrębie obiektu (ang. *discrete fracture network*)
DGI	–	dokumentacja geologiczno-inżynierska
DGI-CO2	–	dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania dwutlenku węgla
DGI-PMS	–	dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji
DGI-PSO	–	dokumentacja geologiczno-inżynierskiej sporządzana w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego składowania odpadów
DH, DH-P, DH-S	–	pionowe profilowania sejsmiczne DH, fali P, fali S, (ang. *downhole*)
DMT	–	badania dylatometryczne
DP	–	sondowania dynamiczne
DRHO	Mg/m^3	poprawki do gęstości w badaniach geofizycznych otworowych
DSH	–	metoda Debye'a-Scherera-Hulla; służy do badania substancji polikrystalicznych
DTA	–	różnicowa analiza termiczna
DZW	–	Dolnośląskie Zagłębie Węglowe
E	–	kategoria pobierania próbek skał (wiercenia)
E	MPa	moduł Younga (ang. *Young's modulus*) (moduł odkształcenia osiowego)
E_{av}	MPa	średni moduł Younga (ang. *average Young's modulus*)
E_d	GPa	dynamiczny moduł Younga
EDS	–	rentgenowska spektroskopia energodyspersyjna
EF	–	fundament energetyczny (ang. *energy foundation*)

Tabela 82 cd.

1	2	3
EGR	–	składowanie dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia gazu (ang. *enhanced gas recovery*)
EN	–	Norma Europejska
EOR	–	składowanie dwutlenku węgla ze wspomaganiem wydobycia ropy naftowej (ang. *enhanced oil recovery*)
E_s	MPa	sieczny moduł Younga (secant)
E_{st}	MPa	statyczny moduł Younga
E_t	MPa	styczny moduł Younga (tangent)
ETS	–	unijny system handlu uprawnieniami do emisji
F	N	maksymalna siła osiowa potrzebna do utrzymania stałej wysokości próbki
FDM	–	metoda różnic skończonych (ang. *finite difference method*)
FEM	–	metoda elementów skończonych (ang. *finite element method*)
FID	–	ostateczna decyzja inwestycyjna (ang. *final investment decision*)
FLZG	–	fundusz likwidacji zakładu górniczego
F_{max}	N	wartość siły, przy której następuje zniszczenie próbki
FOX50	–	stacjonarna sonda do badań termicznych
FVM	–	metoda objętości skończonych (ang. *finite volume method*)
G	MPa	moduł ścinania (ang. *shear modulus*) (moduł odkształcenia postaciowego) (moduł Kirchhoffa)
G_d	GPa	dynamiczny moduł ścinania
GDOŚ	–	Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska
GIS	–	System informacji geograficznej/przestrzennej (ang. *Geographical/Geospatial Information System*)
GR	API	całkowita promieniotwórczość gamma
GSI	–, pkt	klasyfikacja masywu skalnego Hoeka-Browna (ang. *Geological Strength Index*); wskaźnik oceny masywu skalnego
G_{st}	MPa	statyczny moduł ścinania
GUGiK	–	Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii
GZi	–	wskaźniki proweniencji (symbol zależy od rodzaju minerałów wykorzystywanych do analizy)
GZW	–	Górnośląskie Zagłębie Węglowe
H	m	wysokość ługowanej komory solnej (kawerny)
h	m	wysokość próbki
H	m	wysokość próbki walcowej
H	m n.p.m.	rzędna, stosowana w geodezji
H/D	m	współczynnik wysokość do średnicy ługowanej komory solnej (kawerny)
HLQ	–	sonda planarna (dysk termiczny) (badania termiczne)
HRAI	–	indukcyjna sonda HRAI (ang. *high resolution array induction*); sonda wysokorozdzielcza do badań geofizycznych otworowych
I_D, Rw	%	wskaźnik rozmywalności
If	–	stopień spękania (ang. *fracture index*)
IGF-PAN	–	Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk
ILD	Ωm	oporność dalekiego zasięgu
ILM	Ωm	oporność indukcyjna średniego zasięgu w badaniach geofizycznych otworowych
IMUZ	–	Instytut Melioracji i Użytków Zielonych

Tabela 82 cd.

1	2	3
I_S	MPa	wytrzymałość na obciążenie punktowe
$I_{S(50)}$	MPa	skorygowana wytrzymałość na obciążenie punktowe
ISO	–	*International Organization for Standardization*
ISOK	–	Informatyczny System Osłony Kraju
ISRM	–	*International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*
J_a	–	wskaźnik przeobrażenia spękań
JIS	–	*Japanese Industrial Standards*
J_n	–	wskaźnik liczby systemów spękań
JPG	–	format danych
J_r	–	wskaźnik chropowatości szczelin
J_V	liczba spękań/m^3	objętościowy wskaźnik spękań
J_w	–	wskaźnik zawodnienia
K	%	zawartości potasu
K	MPa	moduł Helmholtza (moduł odkształcenia objętościowego)
KAPS	–	Krajowy Administrator Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla
K_d	GPa	dynamiczny moduł Helmholtza
k_f	m/s	współczynnik wodoprzepuszczalności (filtracji)
KFG	–, pkt	geofizyczna klasyfikacja fliszowego masywu skalnego, wskaźnik oceny fliszowego masywu skalnego
k_{fs}	m/s	współczynnik filtracji dla całej formacji skalnej (dla wody)
KGHM	–	nazwa spółki KGHM Polska Miedź SA
k_k	mD	przepuszczalność ekstrapolowana dla nieskończonego ciśnienia równa przepuszczalności pomierzonej dla nieściśliwej, nie wchodzącej w interakcję ze skałą cieczy
k_p *(K)*	D, mD (m^2)	przepuszczalność (współczynnik przepuszczalności)
KPMG	–	kawernowy podziemny magazyn gazu
Ks	%	wskaźnik porowatości szczelinowej
Ks	%	wskaźnika drożności szczelin w górotworze
K_{st}	MPa	statyczny moduł Helmholtza
k_v	m/s	współczynnik filtracji
l	–	intensywność względna
L	m	całkowita długość rdzenia wiertniczego (rdzeniowanego otworu)
L	m	długość linii pomiarowej
L	m	długość walca
L	m	rozstaw otworów dla magazynowania gazu
L	MPa	stała Lamégo
L_d	GPa	dynamiczna stała Lamégo
LGOM	–	Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy
L_k	mm	wysokość końcowa próbki
L_{kx}	mm	końcowa odległość między punktami pomiaru w kierunku x
LNG	–	skroplony gaz ziemny (ang. *liquefied natural gas*)
L_p	mm	wysokość początkowa próbki

Tabela 82 cd.

1	2	3
LPG	–	skroplony gaz petrochemiczny (ang. *liquefied petroleum gas*)
L_{px}	mm	początkowa odległość między punktami pomiaru w kierunku x
L_R	m	długość odcinka otworu wiertniczego
LRC	–	obiekt podziemny w wyrobisku górniczym z wewnętrzną obudową (ang. *lined rock caverns*)
L_{st}	MPa	statyczna stała Lamégo
LVDT	–	klasyczny przetwornik liniowy
LWD	–	metoda polegającą na zamontowaniu urządzenia pomiarowego w końcowej części przewodu wiertniczego (ang. *logging while drilling*)
LZW	–	Lubelskie Zagłębie Węglowe
M	–	elektroda potencjałowa M (ang. P1)
m	–	współczynnik Klinkenberga
m	Mg	masa próbki skały w stanie naturalnym
m_c	Mg	masa szkieletu skalnego (masa sproszkowanej i wysuszonej próbki skały)
MD	–	skały odkształcające się umiarkowanie ciągliwie (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)
Md	%	mediana
m_d	g	masa suchej próbki
m_i	g	kolejne masy próbki w trakcie badania
MICP	–	porozymetria rtęciowa
MIDAS	–	System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych
MPGN	–	Mapa Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej
m_s	g	masa nasyconej próbki
MWTS	–	magazyn energii cieplnej w wyrobiskach górniczych (ang. *mine water thermal storage*)
MZi	–	wskaźniki proweniencji (symbol zależy od rodzaju minerałów wykorzystywanych do analizy)
N	–	elektroda potencjałowa N (ang. P2)
N	–	ilość cykli napełniania i opróżniania komory
N	–	liczba śladów spękań, szczelin
NAG	–	Narodowe Archiwum Geologiczne
n_e	%, –	porowatość efektywna
NFOŚiGW	–	Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
n_o	%	nasiąkliwość objętościowa
OPZ	–	opis przedmiotu zamówienia
OZE	–	odnawialne źródła energii
P	–	propan techniczny (P)
P	At	ciśnienie przepływu
P	m/s	fala sejsmiczna podłużna
P, p	MPa, Pa, bar	ciśnienie (ogólnie)
P/B	–	propan-butan (P/B)
$P = \sigma_2 = \sigma_3$	MPa	ciśnienie okólne
P_1^2, P_2^2	At	różnica ciśnień na wejściu i wyjściu walca
P_{25}	–	pierwszy kwartyl

Tabela 82 cd.

1	2	3
P_{75}	–	trzeci kwartyl
P_c	kPa	naprężenie nadkładu
P_c, *p (n)*	%, –	porowatość całkowita; porowatość
PDF	–	format danych
Pe	barn/elektron	indeks absorpcji fotoelektrycznej
PEP 2040	–	„Polityka energetyczna Polski do 2040 roku”
pgg	–	Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze
PGNiG	–	Polskie Górnictwie Naftowe i Gazownictwo
pH	–	ilościowa skala kwasowości i zasadowości roztworów wodnych związków chemicznych
PIG-PIB		Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
PKMG	–	podziemny kawernowy magazyn gazu
PL-1992		państwowy układ geodezyjnych współrzędnych płaskich prostokątnych
p_{max}	Pa, bar	maksymalne ciśnienie substancji magazynowej
PMG (PZP)	–	podziemny magazyn gazu (cz. Podzemních zásobníků plynu)
p_{min}	Pa, bar	minimalne ciśnienie substancji magazynowej
PMRiP	–	Podziemny Magazyn Ropy i Paliw
PMS	–	podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji
PMT	–	badanie presjometryczne różnego typu
PN	–	Polska Norma
P_o, p_o (n_o)	%, –	porowatość otwarta
P_p	kPa	ciśnienie porowe
PRG	–	projekt robót geologicznych
PS CO_2	–	podziemne składowisko dwutlenku węgla
PSO (UTD)	–	podziemne składowisko odpadów (niem. Untertagedeponie)
PTES	–	magazyn energii cieplnej w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych (ang. *pit thermal energy storage*)
PTn	–	profilowanie temperatury w warunkach nieustalonej równowagi cieplnej
Ptu	–	profilowanie temperatury w warunkach ustalonej równowagi cieplnej
PZ1	–	oznaczenia cyklotemów
PZ2	–	
PZ3	–	
PZ4	–	
PZ4a	–	
PZ4b	–	
PZ4c-e	–	
Q	–	obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi wynosi raz na 500 lat (Q 0,2%)
Q	–	klasyfikacja masywu skalnego Bartona, Liena, Lunde‘a (ang. *rock mass quality*); wskaźnik oceny masywu
q	dm^3/min/ 0,01MPa/m	wodochłonność jednostkowa
q	m^3/s	przepływ

Tabela 82 cd.

1	2	3
q_r	m^3/s	wydatek w warunkach normalnych
r	–, %	wskaźnik rozmakalności
r_d	mm	promień krążka
R_e	MPa	krytyczna wartość; granica plastyczności (wartość naprężenia przy którym zaczynają powstawać nieodwracalne odkształcenia plastyczne)
RFT	–	badanie za pomocą próbnika do pomiaru przepuszczalności pionowej skał oraz określeniu izolacji poszczególnych warstw wodonośnych (ang. *repeat formation tester*)
RHOB	Mg/m^3	gęstość objętościowa w badaniach geofizycznych otworowych
RMR	–, pkt	klasyfikacja masywu skalnego Bieniawskiego (ang. *rock mass rating*); wskaźnik oceny masywu
r_p	mm	promień powierzchni poddanej równomiernemu obciążaniu
RQD	–, %, m	klasyfikacja masywu skalnego Deere'a; wskaźnik spękania masywu skalnego (syn. Wskaźnik podzielności rdzenia wiertniczego; wskaźnik RQD) (ang. *rock quality designation*),
RTidx	–	wskaźnik właściwości hydrodynamicznych środowiska sedymentacji
RW	%	stopień zwietrzenia, określony jako procentowy udział gruntu rezydualnego do okruchów skały macierzystej
RZi	–	wskaźniki proweniencji (symbol zależy od rodzaju minerałów wykorzystywanych do analizy)
S	%	ubytek masy próbki pomiędzy masą przed zamrożeniem i po ostatnim cyklu odmrożenia
S	m	odległość między ługowanymi komorami solnymi (kawernami)
S	m/s	fala sejsmiczna poprzeczna
S	mm^2	pole przekroju poprzecznego próbki
S/D	–	współczynnik odległość między ługowanymi komorami solnymi (kawernami) do średnicy ługowanej komory solnej (kawerny)
S_l	1/m	szczelinowatość liniowa
SCR	–	uzysk litego rdzenia (ang. solid core recovery)
SCW	–	magazyn energii cieplnej w otworze studziennym (ang. *standing column well*)
SEM	–	skaningowy mikroskop elektronowy
SFL	Ωm	oporność sferycznie sterowana w badaniach geofizycznych otworowych
S_g	–	nasycenie gazem
SHP	–	format danych
Sk	–	skośność rozkładu
S_o	–	nasycenie ropą
So	–	współczynnik wysortowania
SOPO	–	System Osłony Przeciwosuwiskowej
SRF	–	wskaźnik stanu naprężeń masywu skalnego
SRK	–	Spółka Restrukturyzacji Kopalń SA
S_w	–	nasycenie wodą
SWOT	–	analiza SWOT; nazwa będąca akronimem angielskich słów *strengths* (mocne strony), *weaknesses* (słabe strony), *opportunities* (szanse) i *threats* (zagrożenia)
T	–	skały odkształcające się przejściowo (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)
T	°C/m, K/m	gradient geotermalny
T	dzień	długość cyklu zatłaczania i odbioru
t	mm	grubość krążka

Tabela 82 cd.

1	2	3
T	°C, K	temperatura (ogólnie)
t	s	czas
t_0	min.	czas po czasie t
TCR	m	całkowity uzysk rdzenia (ang. *total core recovery*)
TCS	–	skaner przewodności cieplnej (ang. *thermal conductivity scanner*)
Th	ppm	zawartości toru
TIF	–	format danych
TK04	–	miernik właściwości termicznych
Trzyliterowy symbol (od A do H)	–	rozmakalność
TTES	–	magazyn energii cieplnej w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych (ang. *tank thermal energy storage*)
TXT	–	format danych
U	ppm	zawartości uranu
UCS	MPa	*Unconfined Compression Strength*
UES	–	podziemny magazyn energii (ang. *underground energy storage*)
UGS	–	podziemny magazyn gazu (ang. *underground gas storage*)
UHS	–	podziemny magazyn wodoru (ang. *underground hydrogen storage*)
UNESCO	–	*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
UOFS	–	podziemny magazyn ropy naftowej i paliw (ang. *underground oil and fuel storage*)
UPHS	–	podziemne Magazyn szczytowo-pompowe (ang. *underground pumped hydro storage*)
URC	–	obiekt podziemny w wyrobisku górniczym obiekty bez obudowy (ang. *unlined rock caverns*)
UTES	–	podziemny magazyn energii cieplnej (ang. *underground thermal energy storage*)
V	cm^3, m^3	objętość próbki (skały)
V	m/s	prędkość fali sejsmicznej
V	ml	objętość przestrzeni porowej
V_1	cm^3	objętość porów otwartych
V_2	cm^3	zewnętrzna objętość skały
V_3	cm^3	objętość szkieletu skalnego
VB	–	skały odkształcające się bardzo krucho (Handin, 1966 za Łukaszewski, 2013)
$Vp_{\perp}$	m/s	prędkość fali podłużnej podłużnej w kierunku prostopadłym do osi próbki, do uwarstwienia
Vp	m/s	prędkość fali sejsmicznej podłużnej
V_p	ml	objętość porów
$Vp_{\parallel}$	m/s	prędkość fali podłużnej podłużnej w kierunku równoległym do osi próbki, do uwarstwienia
$Vr_{\perp}$	m/s	prędkość fali powierzchniowej w kierunku prostopadłym do osi próbki, do uwarstwienia
Vr, V_R	m/s	prędkość fali sejsmicznej powierzchniowej
$Vr_{\parallel}$	m/s	prędkość fali powierzchniowej w kierunku równoległym do osi próbki, do uwarstwienia
$Vs_{\perp}$	m/s	prędkość fali poprzecznej w kierunku prostopadłym do osi próbki, do uwarstwienia
Vs	m/s	prędkość fali sejsmicznej poprzecznej
V_s	m^3	objętość szkieletu skalnego (objętość sproszkowanej i wysuszonej próbki skały)

Tabela 82 cd.

1	2	3
Vs_l	m/s	prędkość fali poprzecznej w kierunku równoległym do osi próbki, do uwarstwienia
Vsh	m/s	prędkość fali poprzecznej w płaszczyźnie poziomej
Vsv	m/s	prędkość fali poprzecznej w płaszczyźnie pionowej
V_t	cm^3	objętość CO_2
VTI	–	anizotropia o symetrii pionowej V; poprzecznej T (ang. *vertical transverse isotropy*)
w	%	wilgotność skały
w_{ch}	%	współczynnik wodochłonności
w_{cp}	MPa	wskaźnik ciśnienia pęcznienia
w_m	–, %	współczynnik odporności na zamarzanie
w_{op}	–	wskaźnik odkształcenia pęcznienia
WOTW	–	wskaźnika oceny technicznej wyrobiska
WRW	%	współczynnik redukcji wytrzymałości, wyrażony jako stosunek wytrzymałości na ściskanie skały zwietrzałej do wytrzymałości skały niezwietrzałej (WRW = Rc zwietrzeliny/Rc skały)
WUG	–	Wyższy Urząd Górniczy
WWA	–	wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
X	m	współrzędna płaska X, stosowana w geodezji
XLS	–	format danych
XRD	–	dyfrakcja rentgenowska
XRF	–	fluorescencyjna analiza rentgenowska
XRMI	–	mikroimager elektryczny
X-WDS	–	mikroanaliza rentgenowska spektrometrem rentgenowski dyspersji długości fali wtórnego promieniowania
Y	g/m^2	nasiąkliwość kapilarna
Y	m	współrzędna płaska Y, stosowana w geodezji
Z	–	poprawka na ściśliwość gazu
Zp	m/s	impedancja fali podłużnej P
Zs	m/s	impedancja fali poprzecznej S
ZTR	%	wskaźnik dojrzałości petrograficznej
α	1/K	rozszerzalność cieplna
α	m^2/s	dyfuzyjność cieplna
α	$nm^3/m^3 \times Pa$	rozpuszczalność
α	°	kąt między płaszczyzną ścinania a kierunkiem siły ściskającej
B	–	liczba kanałów w kostce jednostkowej w kierunku przepływu
γ	N/m^3	ciężar właściwy
$\Delta P/\Delta_x$	At	gradient ciśnienia
ΔR	m	straty rdzenia wiertniczego
ε	–	odkształcenie (ogólnie)
ε	F/m	przenikalność elektryczna
$\dot{\varepsilon}$	1/s	prędkość odkształcenia
ε_v	–	odkształcenie objętościowe

Tabela 82 cd.

1	2	3
ε_x	–	odkształcenie podłużne
ε_x	%	odkształcenie pęcznienia w kierunku osi x
$\varepsilon_{x,y}$	–	odkształcenie poprzeczne
ε_{xy}	–	odkształcenie obwodowe
ε_z	–	odkształcenie osiowe
λ, k	W/K m	przewodność cieplna
μ	cP	lepkość (stała lepkości)
μ	mg/cm^3	współczynnik odczytywany z tabel przedstawiających zależność masy $CaCO_3$ jaka jest potrzebna, aby w danych warunkach ciśnienia i temperatury wydzielić 1 cm^3 CO_2
μ	Pa*s	pełzanie
ν	–	współczynnik Poissona (ang. *Poisson's ratio*)
ν_{av}	–	średni współczynnik Poissona (ang. *average Poisson's ratio*)
ν_d	–	dynamiczny współczynnik Poissona
ν_{st}	–	statyczny współczynnik Poissona
ν_t		styczny współczynnik Poissona (ang. *tangent Poisson's ratio*)
ρ	Mg/m^3, kg/m^3	gęstość
ρ	Ωm	oporność elektryczna (rezystywność, oporność elektryczna właściwa, oporność, opór elektryczny właściwy)
ρ_a	Ωm	oporność elektryczna pozorna, oporność pozorna
ρ_b, ρ_s	Mg/m^3, kg/m^3	gęstość objętościowa skały
ρ_r	Mg/m^3, kg/m^3	gęstość właściwa szkieletu skalnego
ρ_{Rh}	g/cm^3	gęstość wody
σ	MPa	naprężenie
$\dot{\sigma}$	MPa/s	prędkość przyrostu naprężenia
σ_1	MPa	naprężenie główne (największe)
σ_{1max}	MPa	naprężenie osiowe
σ_{1max}-σ_3	MPa	maksymalne naprężenie różnicowe
σ_1-σ_3	MPa	naprężenie różnicowe
σ_2	MPa	naprężenie boczne
σ_3	MPa	naprężenie główne (najmniejsze)
σ_c, Rc	MPa	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie
$\sigma_{c\perp}$, $Rc_\perp$	MPa	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku prostopadłym do uwarstwienia
$\sigma_{c\parallel}$, $Rc_\parallel$	MPa	wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku równoległym do uwarstwienia
σ_{cr}	MP	naprężenie krytyczne
σ_g, R_g	MPa	wytrzymałość na zginanie
σ_{h0}	MPa	naprężenie poziome in situ
σ_{hmax}	MPa	maksymalne naprężenie poziome
σ_{hmin}	MPa	minimalne naprężenie poziome
$\sigma_{I/cr}$	MPa	granica maksymalnej wartości naprężenia, po którym następują fazy pękania poniszczeniowego
$\sigma_{I/II}$	MPa	granica kompakcji

Tabela 82 cd.

1	2	3
$\sigma_{II/III}$	MPa	granica dylatacji względnej (mikrodylatancji), początek rozwoju inicjalnego pękania (pękanie stabilne)
$\sigma_{III/IV}$	MPa	granica liniowości odkształceń osiowych (pękanie stabilne)
$\sigma_{IV/V}$	MPa	granica dylatancji właściwej (makrodylatancji – pękanie niestabilne)
σ_n	MPa	naprężenie normalne
σ_T	MPa	naprężenie rozciągające
σ_t, R_t	MPa	wytrzymałość na ścinanie
σ_T, σ_r, R_r, σ_θ	MPa	wytrzymałość na rozciąganie
σ_{tc}, R_{tc}	MPa	wytrzymałość na trójosiowe ściskanie
σ_{tmax}, R_{tmax}	MPa	maksymalna wytrzymałość na ścinanie
σ_{tR}, R_{tR}	MPa	rezydualna wytrzymałość na ścinanie
σ_{v0}	MPa	naprężenie pionowe *in situ*
τ	MPa	naprężenie styczne
τ_0	MPa	parametr spójności
τ_f	MPa	naprężenie ścinające
φ	°	kąt zwilżenia dla rtęci
φ'	°	efektywny kąt tarcia wewnętrznego
φ; ϕ	°	kąt tarcia wewnętrznego
φ_R	°	rezydualny kąt tarcia wewnętrznego
φ'_R	°	rezydualny efektywny kąt tarcia wewnętrznego

AKTY PRAWNE I LITERATURA

AKTY PRAWNE

DECYZJA Rady 2003/33/WE z dnia 19 grudnia 2002 r. ustanawiająca kryteria i procedury przyjęcia odpadów na składowiska na podstawie art.16 i Załącznika II do dyrektywy 1999/31/WE (Dz.U. UE L 011 z 16/01/2003, rozdział 15, tom 07, str. 314–336).

DYREKTYWA Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG, Euratom, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.

DYREKTYWA Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów.

DYREKTYWA Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów (Dz.U.UE L 182 z 16.7.1999 z późn. zm., rozdział 15, tom 04, str. 228–246).

DYREKTYWY Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylające niektóre dyrektywy (Dz.U. L 312 z 22.11 2008 z późn. zm., s. 3).

OBWIESZCZENIE Ministra Środowiska z dnia 21 września 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. 2021 poz. 1617).

PROJEKT ustawy o wielkoobszarowych terenach zdegradowanych z dn. 22.07.2022, nr UD312.

PROJEKT ustawy o zmianie ustawy Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw z dnia 25.10.2021, nr UD280 (projekt ustawy podpisany przez prezydenta 1 września 2023, ale nieopublikowany).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Aktywów Państwowych z dnia 19 czerwca 2020 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2020 poz. 1094).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 1118).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Energii z dnia 22 sierpnia 2019 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2019 poz. 1880)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie (Dz.U. 2013, poz. 640)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki z dnia 25 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi (Dz.U. 2014 poz. 812).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz.U. 2015 poz.1277).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. 2020 poz. 10).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Rozwoju z dnia 18 sierpnia 2020 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz.U. 2022 poz. 1670).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 30 października 2006 r. w sprawie niezbędnych elementów struktury dokumentów elektronicznych (Dz.U. 2006 nr 206 poz. 1517).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie sposobu i zakresu wykonywania obowiązku udostępniania i przekazywania informacji oraz próbek organom administracji geologicznej przez wykonawcę prac geologicznych (Dz.U. 2001 nr 153 poz. 1781).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie korzystania z informacji geologicznej za wynagrodzeniem (Dz.U. 2011 poz. 1724).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji (Dz.U. 2011 poz. 1696, Dz.U. 2015 poz. 964).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 28 grudnia 2011 r. w sprawie podziemnych składowisk odpadów (Dz. U. nr 298 poz. 1771; uznany za uchylony).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla (Dz.U. 2014 poz. 591).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz. U. 2014, poz. 1272).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Dz.U. 2015 poz. 796).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 9 czerwca 2015 r. w sprawie przekazywania informacji z bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych (Dz.U. 2015 poz. 903).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz.U. 2015 poz. 1840).

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. 2016 poz. 2033).
ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 30 października 2017 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania informacji geologicznej (Dz.U. 2017 poz. 2075).
ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dz.U. 2017 poz. 2293).
ROZPORZĄDZENIE Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. 2012 poz. 463).
ROZPORZĄDZENIE nr 1907/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i stosowanych ograniczeń w zakresie chemikaliów (REACH) i utworzenia Europejskiej Agencji Chemikaliów.
ROZPORZĄDZENIE Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/852 z dnia 17 maja 2017 r. w sprawie rtęci oraz uchylające rozporządzenie (WE) nr 1102/2008.
ROZPORZĄDZENIE Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1099/2008 z dnia 22 października 2008 r. w sprawie statystyki energii (Dz. Urz. UE L 304 z 14.11.2008, str. 1, z późn. zm.).
ROZPORZĄDZENIE Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. 2012 poz. 1247, Dz.U. 2019 poz. 2494).
ROZPORZĄDZENIE Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. 2019 poz. 1839).
UCHWAŁA Nr 239 Rady Ministrów z dnia 13 grudnia 2011 r. w sprawie przyjęcia Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2030 (M.P. 2012 poz. 252).
UCHWAŁA Nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. w sprawie przyjęcia „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r." (M.P. 2021 poz. 1138).
UCHWAŁA Nr 39 Rady Ministrów z dnia 1 marca 2022 r. w sprawie przyjęcia „Polityki Surowcowej Państwa" (M.P. 2022 poz. 371).
USTAWA z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. 2023 poz. 682, z późn. zm.).
USTAWA z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji (Dz.U. 2015 poz. 1483).
USTAWA z dnia 17 lutego 2005 r. o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne (Dz.U. 2023 poz. 57 z późn. zm.).
USTAWA z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie (Dz.U. 2020 poz. 2187).
USTAWA z dnia 16 lutego 2007 r. o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym (Dz.U. 2020 poz. 411).
USTAWA z dnia 10 lipca 2008 r. o odpadach wydobywczych (Dz.U. 2020 poz.2018).
USTAWA z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2021 poz. 247).
USTAWA z dnia 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach (Dz.U. 2020 poz. 2289 z późn. zm.).
USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2022 poz. 1072 z późn. zm.).
USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. 2020 poz. 797 z późn. zm.).

NORMY

ASTM C110-20 Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone.
ASTM D2799-21 Standard Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal.
ASTM D2936-20 Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.
ASTM D3967-16 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.
ASTM D4394-17 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Rigid Plate Loading Method.
ASTM D4395-17 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Flexible Plate Loading Method.
ASTM D4404-18 Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry.
ASTM D4506-21 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of a Rock Mass Using the Radial Jacking Test .
ASTM D4612-16 Standard Test Method for Calculating Thermal Diffusivity of Rock and Soil.
ASTM D4729-19 Standard Test Method for In Situ Stress and Modulus of Deformation Using the Flat Jack Method.
ASTM D5334-22a Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
ASTM D5550-14 Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer.
ASTM D5731-16 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.
ASTM D7012-14e1 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.
ASTM D8097-17e1 Standard Test Method for Determination of Bulk Density for Specific Size Fractions of Calcined Petroleum Coke Using a Transaxial Pressure Pycnometer.
ASTM D8359-21 Standard Test Method for Determining the In Situ Rock Deformation Modulus and Other Associated Rock Properties Using a Flexible Volumetric Dilatometer.
ASTM E562-19e1 Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count.
ASTM E562-19e1 Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count.
ISO 15901-1:2016 Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption. Part 1: Mercury porosimetry.
PN-B-04100:1966 Materiały kamienne. Oznaczanie gęstości objętościowej, gęstości, porowatości i szczelności (wycofana i zastąpiona przez PN-EN 1936).
PN-B-04101:1985 Materiały kamienne. Oznaczanie nasiąkliwości wodą (wycofana).
PN-B-04102:1985 Materiały kamienne. Oznaczanie mrozoodporności metodą bezpośrednią (wycofana).
PN-B-04110:1984 Materiały kamienne. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie (wycofana zastąpiona przez PN-EN 1926).
PN-B-04481:1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu (wycofana).
PN-B-06714-17:1977 Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie wilgotności (wycofana zastąpiona przez PN-EN 1097-5).

PN-C-96008:1998 Przetwory naftowe. Gazy węglowodorowe. Gazy skroplone C3-C4 (aktualna).
PN-EN 1097-5:2008 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 5: Oznaczanie zawartości wody przez suszenie w suszarce z wentylacją (aktualna).
PN-EN 12371:2010 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie mrozoodporności (aktualna).
PN-EN 12372:2022-08 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej (aktualna).
PN-EN 12407:2019-07 Metody badań kamienia naturalnego. Badania petrograficzne (aktualna).
PN-EN 13161:2008 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie przy stałym momencie (aktualna).
PN-EN 1367-1:2007 Badania właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych. Część 1: Oznaczanie mrozoodporności (aktualna).
PN-EN 13755:2008 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym (aktualna).
PN-EN 14146:2005 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie dynamicznego modułu sprężystości (pomiar podstawowej częstotliwości rezonansowej) (aktualna).
PN-EN 14579:2005 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie prędkości rozchodzenia się dźwięku (aktualna).
PN-EN 14580:2006 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie statycznego modułu sprężystości (aktualna).
PN-EN 1918-1:2016-07 Infrastruktura gazowa. Podziemne magazynowanie gazu. Część 1: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w warstwach wodonośnych (aktualna).
PN-EN 1918-2:2016-07 Infrastruktura gazowa. Podziemne magazynowanie gazu. Część 2: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w złożach ropy naftowej i gazu (aktualna).
PN-EN 1918-3:2016-07 Infrastruktura gazowa. Podziemne magazynowanie gazu. Część 3: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wyługowanych komorach solnych (aktualna).
PN-EN 1918-4:2016-07 Infrastruktura gazowa. Podziemne magazynowanie gazu. Część 4: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w górniczych kawernach skalnych (aktualna).
PN-EN 1918-5:2016-07 Infrastruktura gazowa. Podziemne magazynowanie gazu. Część 5: Zalecenia funkcjonalne dotyczące urządzeń powierzchniowych (aktualna).
PN-EN 1925:2001 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie współczynnika nasiąkliwości kapilarnej (aktualna).
PN-EN 1926:2007 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie (aktualna).
PN-EN 1936:2010 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości (aktualna).
PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego (aktualna).
PN-EN 932-3:2022-12 Badania podstawowych właściwości kruszyw. Część 3: Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego (aktualna).
PN-EN ISO 10693:2014-06 Jakość gleby. Oznaczanie zawartości węglanów. Metoda objętościowa (aktualna).
PN-EN ISO 14688-1:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis (aktualna).
PN-EN ISO 14688-2:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania (aktualna).
PN-EN ISO 14689:2018-05 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie skał (aktualna).
PN-EN ISO 17892-4:2017-01 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 4: Badanie uziarnienia gruntów (aktualna).
PN-EN ISO 22475-1:2022-04 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Metody poboru próbek oraz pomiarów wody gruntowej. Część 1: Zasady techniczne poboru próbek gruntu, skał oraz wody gruntowej (aktualna).
PN-EN ISO 22476-15:2016-10 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 15: Pomiary w otworach wiertniczych (aktualna).
PN-EN ISO 22476-5:2016-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 5: Badanie dylatometrem (aktualna).
PN-G 04305:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie z użyciem próbek foremnych (aktualna).
PN-G-04302:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania (aktualna).
PN-G-04303:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie z użyciem próbek foremnych (aktualna).
PN-G-04304:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie proste (aktualna).
PN-G-04307:1998 Skały zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie z użyciem próbek nieforemnych (aktualna).
PN-G-04352:1997 Skały zwięzłe. Oznaczanie ścieralności i rozmakalności skał w wodzie na próbkach o niewielkiej masie (wycofana, bez zastąpienia).
prEN 1997-2:2022 (E) Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2: Ground properties.
Tempos 2018-2021 Thermal Properties Analyzer Operator's Manual, METER Group.
TK04 2019 Thermal Conductivity Meter User's Manual Version 5.5, TeKa, Berlin, Germanymanual.

LITERATURA

ABERG B., 1977 – Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock. RockStore 77, 2: 399–413.
ALLEN K., 1972 – Eminence Dome – Natural Gas Storage in salt comes of age. Journal of Petroleum Technology, 24, 1299–1301.
ANDÒ S., GARZANTI E., PADOAN M., LIMONTA M., 2012 – Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis. Sedimentary Geology, 280: 165–178.
ANDRUSIKIEWICZ W., WRZOSEK J., ZELJAŚ D., 2019 – Możliwość budowy podziemnego składowiska odpadów w obszarze górniczym "Bądzów". *W*: Abstrakty XXIV Międzynarodowego Sympozjum Solnego Quo Vadis Sal „Kawerny solne jako element proekologicznej polityki energetycznej", Żnin, 9–11.10.2019: 47–48.
ASAGARI A., RAMEZANZADEH A., JALALI S.M.E., BROUARD B., 2020 – Stability Analysis of Salt Cavern Gas Storage Using 2D Thermo-Hydro-Mechanical Finite-Element Software. Journal of Mining and Environment, 11, 1: 77–97.
ASSESSMENT of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe – HyUnder. Grant agreement no.: 303417. Executive Summary 23 June 2014, (http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D8.1_HyUnder-Executive-Summary.pdf) [dostęp: 18.02.2017].
AUFRICHT W.R., HOWARD K.C., 1961 – Salt Characteristics As They Affect Storage of Hydrocarbons. Journal of Petroleum Technology 13, 8: 733–738; doi.org/10.2118/23-PA.

BAART A., LUKAS V., 2010 – Practical Implementation of Underground Waste Disposal. *W*: Workshop Underground Disposal of Hazardous Waste. https://dokumen.tips/documents/workshop-underground-disposal-of-hazardous-waste-workshop-underground-disposal.html.

BACHU S., 2000 – Sequestration of CO_2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. Energy Conversion and Management, 41, 9: 953–970.

BACHU S., 2003 – Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO_2 in geological media in response to climate change. Environmental Geology, 44: 277–289.

BACHU S., ADAMS J., 2003 – Sequestration of CO_2 in geological-media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO_2 in solution. Energy Conversion and Management, 44, 20: 3151–3175.

BAI M., SONG K., SUN Y., HE M., LI Y., SUN J., 2014 – An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 124: 132–136.

BARCHAŃSKI B., 1994 – Składowisko odpadów specjalnych Herfe Neurode, RFN. *W*: Mat. Kon. Nauk. „Nowe technologie w gospodarce złożami soli kamiennej w Polsce", Rytro, 24–26.10.1994: 5–24. OBRTG CHEMKOP, Kraków.

BARCHAŃSKI B., 2003 – Składowanie odpadów niebezpiecznych w podziemnych wyrobiskach kopalni soli – Multideponie Heilbronnie – RFN. *W*: Mat. Symp. „Warsztaty 2003 z cyklu Zagrożenia w górnictwie": 33–49.

BARTON N., 1999 – General report Concerning some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment. Proc. 9th Inter. Congr. Rock Mech. ISRM. Paris

BARTON N., LIEN R., LUNDE J., 1974 – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6: 189–236.

BARTOSIK M., KAMRAT W., KAŹMIERKOWSKI M., LEWANDOWSKI W., PAWLIK M., PERYT T., SKOCZKOWSKI T., STRUPCZEWSKI A., SZELĄG A., 2016 – Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa. Przegląd Elektrotechniczny, 92, 1; DOI: 10.15199/48.2016.12.78.

BAYNES F.J., PARRY S., 2022 – Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects. International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Commission 25 Publication No. 1, s. 129.

BAŻYŃSKI J., DRĄGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., KACZYŃSKI R., RYBICKI S., WYSOKIŃSKI L., 1999 – Zasady sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich. PIG, Warszawa.

BAŻYŃSKI J., TUREK S., 1969 – Słownik hydrogeologii i geologii inżynierskiej. Wydaw. Geol. Warszawa.

BEDNARSKI M., 1955 – Górnictwo ogólne, cz. II. PWN, Łódź–Kraków.

BEHNSEN H., 2008 – Underground repositories for chemically toxic waste in German salt and potash mines. *W*: Deep Geologic Repositories (red. N.T. Rempe). Geological Society of America. Series GSA Reviews in Engineering Geology, 19.

BELENITSKAYA G., 2019 – Salt Systems of the Earth. Scrivener Publisking LLC, p. 691.

BENNION D.B., THOMAS F.B., MA T., IMER D., 2000 – Detailed Protocol for the Screening and Selection of Gas Storage Reservoirs. SPE 59738: 1−12.

BÉREST P., BROUARD B., 1998 – A tentative classification of salts according to their creep properties, Proceedings of the SMRI Spring Meeting: New Orleans.

BÉREST P., BROUARD B., 2003 – Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. Oil i Gas Science and Technology – Rev. IFP, 58: 361–384.

BÉREST P., BROUARD B., DURUP J.G., 2001 – Tightness Tests in Salt Cavern Wells. Oil & Gas Science and Technology, 56: 451–469.

BERGSTROM R.E., 1968 – Subsurface disposal of industrial wastes: Illinois. Geol. Survey Circ. 426.

BEST PRACTICES, 2017 – Site Screening, Site Selection and Site Characterization for Geologic Storage Projects. National Energy Technology Laboratory; https://www.netl.doe.gov.

BESTYŃSKI Z., 1993 – KFG – geophysical flysh rock mass classification in underground structures at complex geological conditions. Proceedings of XX Seminar of CIGB ICOLD Polish Section.

BESTYŃSKI Z., 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Archiwum AGH, Kraków [pr. doctor.].

BESTYŃSKI Z., THIEL K., 1999 – Flysh geotechnical properties by the Geophysical Classification Index KFG. *W*: Proc. 9 Inter. Congress on Rock Mechanics ISRM, Paris: 1339–1346.

BESTYŃSKI Z., THIEL K., 2007 – Badania geofizyczne w rozpoznaniu warunków geotechnicznych budowy tuneli. Górnictwo i Geoinżynieria, 31, 3: 37–43.

BESTYŃSKI Z., THIEL K., ZABUSKI L., 1988 – Zasady geotechnicznych klasyfikacji masywów fliszowych. *W*: Materiały na Seminarium w Świnnej Porębie i Bielsku Białej „Problematyka geotechniczna przy projektowaniu i budowie tuneli hydrotechnicznych": 12–26.

BESTYŃSKI Z., THIEL K., ZABUSKI L., 1989 – Geotechniczne klasyfikacje masywów fliszowych. Rozpr. Hydrotech., 52: 143–163.

BIENIASZ J., CIĄGŁO W., WOJNAR W., 2003 – Nowa metoda pomiarów deformacji solnej struktury filarowo-komorowej wykorzystująca dalmierz laserowy. Geodezja, 9, 2/1: 187–193.

BIENIASZ J., WOJNAR W., SADOWSKI A., WRZOSEK J. 2011 – Zaciskanie wyrobisk na dużych głębokościach w górotworze solnym. Geologia, 3: 207–214.

BIENIAWSKI Z.T., 1973 – Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans. of the S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15: 335–343.

BIENIAWSKI Z.T., 1979 – The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. *W*: Proceedings: 4th International Congress on Rock Mechanics. Montreux, Suisse, 2–8.09.1979: 41–48. Balkema and Swiss Society for Soil and Rock Mechanics.

BIENIAWSKI Z.T., 1989 – Engineering rock mass classification. John Willey & Sons, New York.

BIERNAT H., ZWIERZYŃSKI M., NOGA B., KOŁPACZYŃSKI M., KOTKO D., PAJĄK Ł., SZAST P., 2014 – Projekt robót geologicznych w celu określenia warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich w związku z bezzbiornikowym magazynowaniem gazu w rejonie Marianowo, Etap 2; gm. Marianowo, Stara Dąbrowa, Stargard Szczeciński, pow. stargardzki, woj. zachodniopomorskie. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr inw. 4959/2014].

BLASCHKE W., 2009 – Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.

BOBEK K., KONIECZYŃSKA M., JAROSIŃSKI M., 2021 – Tectonics of the Wysoka Kamieńska Graben (NW Poland) and implications for fault sealing potential. Geological Quarterly, 65, 3: 38.

BOGUSZ J., KŁOS A., FIGURSKI M., JAROSIŃSKI M., KONTNY B., 2013 – Investigation of the reliability of local strain

analysis by means of the triangle modelling. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 10, 3: 93–305.

BOGUSZ W., 2017 – Możliwość zastosowania fundamentów termoaktywnych w budownictwie mostowym. Mosty, 1: 42–45.

BOJARSKA K., BZOWSKI Z., 2012 – Wyniki badań wyciągów wodnych odpadów wydobywczych z kopalń węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w aspekcie wpływu na środowisko. Górnictwo i Geologia, 7, 2.

BOLEWSKI A., 1982 – Mineralogia Szczegółowa. Wydaw. Geol., Warszawa.

BORNEMANN O., BRÄUER V., 1999 – Results of geological investigations at the Gorleben salt dome, the potential repository site for radioactive waste in Germany. Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ASME), pp. 6.

BOYCE G.M., Mc GABE W.M., KOERNER Z.M., 1981 – Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression. ASTM. Publ. 750. Philadelphia: 142–154.

BRAŃKA S., 2008 – Analiza potrzeb magazynowych gazu ziemnego w Polsce. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24, 3/2: 25–38.

BRAŃKA S., 2009 – Ekonomiczne uwarunkowania lokalizacji podziemnych magazynów gazu na przykładzie Polski. Geologia, 35, 3: 447–459.

BRAŃKA S., WAWRZYNIAK E., 1994 – Specyfika projektowania i budowy podziemnych magazynów gazu w wysadach solnych na przykładzie KPMG „Mogilno". Przegląd Górniczy, 50, 10: 15–17.

BRASSER T., 2010 – Criteria for Site Selection and Long-Term Safety Assessment. *W*: Workshop Underground Disposal of Hazardous Waste: 25−39; https://dokumen.tips/documents/workshop-underground-disposal-of-hazardous-waste-workshop-underground-disposal.html?page=27.

BRASSOW C.L., 2001 – Use of solution mined salt caverns for the disposal of non-hazardous oil and gas (NOW) waste. *W*: The 8th International Petroleum Environmental Conference, Houston, Texas, November 6–9, 2001; http://ipec.utulsa.edu/Conf2001/brasso2_131.pdf.

BREWITZ W., DROSTE J., STIER-FRIEDLAND G., 2008 – Geological features of the Morsleben repository and their relevance for long-term safety. *W*: Deep Geologic Repositories (red. N.T. Rempe). Geological Society of America. Series GSA Reviews in Engineering Geology, 19: 53–66.

BUJOK P., HORÁKOVÁ M., KLEMPA M., KUNZ A., KŘÍSTEK M., RADO R., VAŠEK M., 2021 – Symulacja parametrów pracy podziemnego magazynu gazu w kontekście typu i szczelności podziemnej struktury magazynowej. Nauka–Technika–Technologia, 1: 7–27; doi: 10.7494/978-83-66727-47-2_1.

BUKOWSKI K., 2011 – Badeńska sedymentacja salinarna na obszarze między Rybnikiem a Dębica w świetle badań geochemicznych, izotopowych i radiometrycznych. Rozprawy i Monografie AGH, 236.

BÜNGER U., MICHALSKI J., CROTOGINO F., KRUCK O., 2016 – Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications. *W*: Compendium of hydrogen energy, 4: Hydrogen use, safety and the hydrogen economy. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy: 133–163.

BURTON D., WOOD L.J., 2013 – Geologically-based permeability anisotropy estimates for tidally-influenced reservoirs using quantitative shale data. Petroleum Geoscience, 19, 1: 3–20.

BZOWSKI Z., DAWIDOWSKI A., 2013 – Monitoring właściwości fizykochemicznego odpadów wydobywczych pochodzących z kopalni węgla kamiennego LW Bogdanka. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego, 150, Inżynieria Środowiska, 30.

CARREAU P.J., 1972 – Rheological equations from molecular network theories. Trans Soc. Rheol., 16, 1: 99–127.

CARTER N.L., HANSEN F.D., 1983 – Creep of rocksalt. Tectonophysics, 92, 4: 275–333.

CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P., (red.), 2006 – Best Practice for the Storage of CO_2 in Saline Aquifers, Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. Raport projektu CO2STORE; www.co2store.org.

CHADWICK R.A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P., 2008 – Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication No. 14.

CHMIELEWSKI J., ŻEBER-DZIKOWSKA I., PAWLAS K., NOWAK-STARZ G., CHOJNOWSKA-ĆWIĄKAŁA I., DĘBSKA A., SZPRINGER M., GWOREK B., CZARNY-DZIAŁAK M., 2020 – Substancje ropopochodne. Zagrożenie dla środowiska i zdrowia w kontekście edukacji ekologicznej. Przemysł Chemiczny, 99, 6: 39–45; DOI: 10.15199/62.2020.6.1.

CHOQUETTE P.W., PRAY L.C., 1970 – Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. AAPG Bulletin, 54, 2: 207–250.

CHROMIK M., 2015 – Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. Przegląd Solny (Salt Review), 11: 44–50.

CHROMIK M., 2016 – Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje. Przegląd Solny (Salt Review), 12: 11–18.

CHRUL T., PAWLIK W., WRZOSEK J., 2017 – Zastosowanie metody georadarowej w górnictwie podziemnym soli kamiennej w kopalni O/ZG „Polkowice-Sieroszowice". Przegląd Solny (Salt Review), 13: 35–46.

CICHA-SZOT R., 2018 – Współczynnik ściśliwości skał i płynów – parametr petrofizyczny, który należy uwzględnić, czy który można pominąć w charakterystyce złóż surowców płynnych? Nafta-Gaz, 74, 6: 451–456; doi: 10.18668/NG.2018.06.05.

CORNET J.S., DABROWSKI M., 2018 – Nonlinear Viscoelastic Closure of Salt Cavities. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51: 3091–3109.

COULOMB C.A., 1773 – Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mém Math Phys Present à l'Acád R des Sci par Divers Savantes, Lûs Dans Ses Assem, 7: 343–387.

COUNDAL P.A., FAIRHURST C., 1986 – Correlation of discontinuum models with physical observations –an approach to estimation of rock mass behavior. Felsbau, 4.

CRISTESCU N., 1993 – A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30, 2: 125–139.

CRISTESCU N., GIODA G., 1994 – Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials. Springer Verlag, Wien–New York.

CRISTESCU N., HUNSCHE U., 1998 – Time Effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons, Chichester.

CROTOGINO F., MOHMEYER K-U., SCHARF R., 2001 – Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation. Paper presented at Spring 2001 Meeting, Orlando, Florida, 15–18th April 2001; AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf.

CYGLICKI M., REMIN Z. (w recenzji) – Rutile to Tourmaline index (RTI) – a tool for recognition of the hydrodynamic power of the depositional environment – a case study from the Campanian Szozdy Delta system, SE Poland, European Epicontinental Basin.

CYRAN K., 2020 – Insight Into a Shape of Salt Storage Caverns. Archives of Mining Sciences, 65: 363–398.

CYRAN K., KOWALSKI M., 2021 – Shape Modelling and Volume Optimisation of Salt Caverns for Energy Storage. Applied Sciences, 11, 1: 423.

CZAPOWSKI G., 1994 – The Middle Badenian rock salts in the Carpathian Foredeep characteristics, origin and economic value. Geological Quaterly, 38, 3: 513–526.

CZAPOWSKI G., 2006 – Możliwości bezpiecznego podziemnego magazynowania węglowodorów (paliw) w strukturach geologicznych na obszarze Polski. Przegląd Geologiczny, 54, 8: 658–659.

CZAPOWSKI G., 2017 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedsudeckiego. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 469: 105–128.

CZAPOWSKI G., 2019 – Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyn) w Polsce – ocena geologiczna. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 477: 21–54.

CZAPOWSKI G., 2022 – Lokalizacja kawern magazynowych w utworach solnych w Polsce – stare i nowe opcje. Przegląd Solny (Salt Review), 16: 5–19.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2009 – Złoża soli w Polsce: stan aktualny i perspektywy zagospodarowania. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 798–811.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010 – Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. Geological Quarterly, 54, 4: 509–518.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. Górnictwo Odkrywkowe, 54, 2: 74–84.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2016 – Mapy wystąpień zasobów perspektywicznych soli w Polsce jako narzędzie w projektowaniu przyszłego zagospodarowania złóż kopalin. Przegląd Solny (Salt Review), 11: 5–31.

CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018 – Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność dla budowy kawern do magazynowania wodoru. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 472: 53–82.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2012 – Stan rozpoznania geologicznego struktur solnych regionu szczecińskiego pod kątem oceny możliwości budowy w ich obrębie kawernowych magazynów i składowisk. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 448, 1: 145–156.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2016 – Baseny solne triasu na obszarze Polski. Przegląd Solny (Salt Review), 12: 98–113.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2018 – Wykształcenie i geochemia bromu utworów solnych pogranicza cyklotemów PZ1 i PZ2 cechsztynu w kłodawskim wysadzie solnym (środkowa Polska). Przegląd Geologiczny, 66, 5: 303–308.

CZAPOWSKI G., CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M., TOMASSI-MORAWIEC H., 2007 – Metodyka modelowania przestrzennego budowy geologicznej osadowych złóż pokładowych na przykładzie cechsztyńskiego złoża soli kamiennej „Mechelinki" nad Zatoką Pucką. Przegląd Geologiczny, 55, 8: 681–689.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., GĄSIEWICZ A., SADŁOWSKA K., 2015 – Obszary perspektywicznych wystąpień i zasoby przewidywane surowców chemicznych Polski na mapach w skali 1 : 200 000 – sól kamienna, sole potasowo-magnezowe i siarka. Przegląd Geologiczny , 63, 9: 561–571.

CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020 – Sól kamienna i sole potasowo-magnezowe. *W*: Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski (red. K. Szamałek i in.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.

CZOP M., ŁAŹNIEWSKA-PIEKARCZYK B., KAJDA-SZCZEŚNIAK M., 2021 – Analysis of the Possibility of Using Slags from the Thermal Treatment of Municipal Waste as Potential Component of Cement – Case Study. Materials, 14, 6491; doi.org/10.3390/ma14216491.

DA COSTA P.V. M., DA COSTA A.M., MENEGHINI J.R., NISHIMOTO K., SAMPAIO C.M., ASSI G., BREDA A., 2020 – Parametric study and geomechanical design of Ultra-deep-water Offshore Salt Caverns for Carbon Capture and Storage in Brazil. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 131: 104354.

DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 2005 – Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

DADLEZ R., JAROSZEWSKI W., 1994 – Tektonika. PWN, Warszawa.

DAVIS D., OUDINOT A., SULTANA A., REEVES S., 2004 – A Screening Model for ECBM Recovery and CO_2 Sequestration in Coal. Topical Report and User's Manual – ARI and US Department of Energy; https://coal-seq.com.

DE WIEST R. J.M., 1969 – Flow through porous media. Academic Press, New York.

DĘBKOWSKI R., KUDEŁKO J., SADECKI Z., WIRTH H., 2010 – Koncepcja zagospodarowania złoża soli kamiennej „Kazimierzów" na składowisko odpadów przemysłu miedziowego LGOM. *W*: Abstrakty XV Międzynarodowego Sympozjum Solnego pt. „Potencjał gospodarczy polskiego górnictwa solnego – stan obecny i perspektywy rozwoju". Świeradów-Zdrój, 21–22.10.2010: 7–8.

DEERE D.U., 1964 – Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology, 1, 1: 16–22.

DEERE D.U., 1989 – Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engrs. Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.

DEERE D.U., MILLER R.P., 1966 – Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report no. AFWL-TR-65-116, pp.327; https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0646610.pdf.

DEERE D.U., HENDRON A.J., PATTON F.D., CORDING E.J., 1967 – Design of surface and near surface construction in rock. *W*: Proc. 8th US Symp. on Rock Mech., New York: 237–302.

DENG J.Q., LIU Y., YANG Q., CUI W., ZHU Y., LIU Y., LI B., 2020 – A viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive model of salt rock for underground energy storage cavern. Computers and Geotechnics, 119: 103288.

DEPOWSKI S., 1973 – Problemy określania na Niżu Polskim obszarów i poziomów perspektywicznych pod względem ropo- i gazonośności. Przegląd Geologiczny, 21, 2: 57–59.

DICKER A.I., SMITS R.M., 1988 – A practical approach for determining permeability from laboratory pressure-pulse decay measurements. *W*: International meeting on petroleum engineering, Tianjin, China; doi.org/10.2118/17578-MS.

DOBAK P., DRĄGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., FROLIK A., KACZYŃSKI R., KOTYRBA A., PINIŃSKA J., RYBICKI S., WOŹNIAK H., 2009 – Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich dla celów likwidacji kopalń. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

DOMONIK A. (red.), 2012a – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał, cz. VI. Centralne Karpaty Zachodnie, t. 13. Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI. Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 128.

DOMONIK A. (red.), 2012b – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał, cz. VI. Centralne Karpaty Zachodnie, t. 14. Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 137.

DOMONIK A., DZIEDZIC A., JARZĄBKIEWICZ A., ŁUKASIAK D., ŁUKASZEWSKI P., PINIŃSKA J., 2009 – Zintegrowany system gromadzenia, przetwarzania i wizualizacji danych geomechanicznych – Baza Danych Geomechanicznych. Górnictwo i Geoinżynieria, 33, 1: 113–123.

DOMONIK A., DZIEDZIC A., ŁUKASZEWSKI P., PINIŃSKA J., 2010 – Baza Danych Geomechanicznych – źródło informacji o właściwościach geomechanicznych skał. *W*: Mat. Konf. „Nowe metody i technologia zagospodarowania złóż i wydobycia węglowodorów w warunkach lądowych i morskich": 733–737. Instytut Nafty i Gazu.

DROGOWSKI J., TADYCH J., 2006 – Budowa geologiczna i zagospodarowanie wysadów solnych „Mogilno I" i „Góra" – stan aktualny i perspektywy. Przegląd Geologiczny, 54, 4: 306.

DRURY L., 1998 – Mine water management by aquifer injection engineering. IMWA Proceedings Johannesburg (Proceedings International Mine Water Association Symposium): 25–30; http://www.mwen.info/docs/imwa_1998/IMWA1998_Drury_025.pdf.

DUBIEL S., ZIAJA J., 2007 – Identyfikacja przyczyn dopływu gazu ziemnego do otworu w zależności od warunków ciśnieniowych dowericania złóż węglowodorów. Wiertnictwo Nafta Gaz, 24, 1: 153–159.

DUBIŃSKI J., KOTERAS A., 2014 – Możliwości składowania CO_2 w strukturach geologicznych. Energetyka, 1: 20–24.

DUBIŃSKI J., SOLIK-HELIASZ E., 2007 – Uwarunkowania geologiczne dla składowania dwutlenku węgla. *W*: Uwarunkowania wdrożenia zero emisyjnych technologii węglowych w energetyce (red. M. Ściążko): 51–56. Wydaw. IChPW, Zabrze.

DUBIŃSKI J., WACHOWICZ J., KOTERAS A., 2010 – Podziemne składowanie dwutlenku węgla – możliwości wykorzystania technologii CCS w polskich uwarunkowaniach. Górnictwo i Geologia, 5, 1.

DUNHAM R.J., 1962 – Classification of carbonate rocks according to depositional textures. *W*: Classification of Carbonate Rocks – A Symposium (red. W.E. Ham): 108–121. AAPG Memoir, 1, Tulsa, Oklahoma.

DUŹNIAK Z., 1969 – Aragonit w kopalni węgla kamiennego „Rymer". Przegląd Geologiczny, 17, 8: 405–407.

DZIEDZIC A., ŁUKASZEWSKI P., 2010 – Pomiary fali ultradźwiękowej w badaniach trójosiowego ściskania. Górnictwo i Geoinżynieria, 34, 2: 223–230.

DZIEDZIC A., ŁUKASZEWSKI P., 2011 – Metodyka badania wybranych skał Polski w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 446, 2: 123–128.

DZIEDZIC A., ŁUKASZEWSKI P., 2015 – Metodyczne uwarunkowania badań geomechanicznych skał pobranych z dużych głębokości w trójosiowym stanie naprężenia. Nafta-Gaz, 71, 1: 3–10.

ECONOMIDES M.J., NOLTE K.G., 2000 – Reservoir Stimulation. 3rd edition, Wiley, s. 856.

EVANS D.J., 2007 – An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology. Volume 1, Text. Volume 2, Figures and Tables. Sustainable and Renewable Energy Programme. Open Report OR/07/023. Version 1; https://pubs.bgs.ac.uk/publications.html?pubID=OR07023; British Geological Survey, Nottingham, UK, s. 357.

EVANS D.J., CHADWICK R.A., 2009 – Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe. Special Publications No. 313, Geological Society, London.

FAVREZ F., 2003 – Up-to-date researches and future trends in underground gas storage facilities: a state of the art review. NATO Advance Research Workshop, "Security of Natural Gas Supply through Transit Countries", Tbilisi, Georgia, 22–24 May, 2003.

FENGLER M., 2012 – Stabilizacja i zestalanie (immobilizacja) odpadów niebezpiecznych ze spalarni odpadów komunalnych w technologii „Geodur". Piece Przemysłowe & Kotły, 11/12: 38–44.

FOH S., NOVIL M., ROCKAR E., RANDOLPH P., 1979 – Underground Hydrogen Storage. Final report. [Salt caverns, excavated caverns, aquifers and depleted fields], Inst Gas Technol DOE, Brookhaven Natl Lab, Upton, NY, p. 283.

FOSSUM A.F., FREDRICH J.T., 2002 – Salt Mechanics Primer for Near-Salt and Sub-Salt Deepwater Gulf of Mexico Field Developments: SANDIA Nat Lab.

FRIEDMAN G.M., 1978 – Classification of sediments and sedimentary rocks. *W*: Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks: 127–136. Springer, Dordrecht.

GALEHOUSE J.S., 1971 – Point counting. *W*: Procedures in Sedimentary Petrology (red. R.E. Carver): 385–407. Wiley, New York.

GAŁEK G., BELCZYK M., 2012 – Podziemny Magazyn Gazu Wierzchowice – rozbudowa do pojemności 1,2 mld nm^3. Nafta-Gaz, 68: 14–26.

GALINIAK G., 2020 – Ekologiczne aspekty budowy i eksploatacji kawernowych podziemnych magazynów gazu; http://www.ebis.pg.gda.pl/.

GALINIAK G., 2003 – Eko Problemy ochrony środowiska podczas budowy i eksploatacji podziemnych magazynów w kawernach solnych na przykładzie KPMG Mogilno. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków [pr. dyplom.].

GALINIAK G., 2004 – Ekologiczne aspekty budowy i eksploatacji kawernowych podziemnych magazynów gazu, IV Krajowe Seminarium Studenckich Kół Naukowych, Politechnika Gdańska; http://www.ebis.pg.gda.pl/4ksskn/materialy_pdf/sesja1/ekologiczne_aspekty_budowy_kpmg.pdf.

GARLICKI A., 1979 – Sedymentacja soli mioceńskich w Polsce. Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie. Komisja Nauk Geologicznych, 119.

GARLICKI A., 1997 – Możliwości podziemnego magazynowania odpadów w polskich złożach soli. *W*: Mat. konf. „Tektonika solna regionu kujawskiego", Uniejów 23–25.10.1997: 13–14. WIND, Wrocław.

GARZANTI E., ANDÒ S., 2019 – Heavy minerals for junior woodchucks. Minerals, 9, 3: 148.

GĄSKA K., 2000 – Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu „Mogilno". Tech. Posz. Geol., Geosynopt. i Geotermia, 42, 223: 33–35.

GĄSKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A., 2012 – Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego Oddział Warszawa II, Warszawa.

GLUYAS J., MATHIAS S., (red.), 2013 – Geological Storage of Carbon Dioxide (CO_2). Geoscience, Technologies, Environmental Aspects and Legal Frameworks. Woodhead Publishing Series in Energy.

GLUZIŃSKA J., PASZEK A., RUSEK P., 2014 – Aspekty środowiskowe wykorzystania płynów zwrotnych z pozyskiwania gazu z łupków oraz badania wstępne możliwości zagospodarowania płuczek do rekultywacji terenu. Chemik, 68: 843–849.

GOGOLEWSKA A.B., MARKOWIAK A., 2017 – Konwergencja jako wskaźnik zagrożenia sejsmicznego w wybranych polach eksploatacyjnych w KGHM Polska Miedź O/ZG Polkowice-Sieroszowice. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, 101: 159–172.

GONET A., MACUDA J., LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., ŚLIWA T., 2005 – Kierunki adaptacji obiektów naftowych. Sbornik vedeckych praci Vysoke skoly banskie – Technickie Univerzity Ostrava. Monografie, 15 rocznik LI.

GOODALL D.C., 1986 – Containment of gas in rock caverns. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Unioversity of California, Berkeley.

GOODALL D.C., ÅBERG B., BREKKE T.L., 1988 – Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns. Rock Mechanics and Rock Engineering, 21, 4: 235–258.

GÓRECKI W. (red.), 2004 – Analiza możliwości wykorzystania sczerpywalnych złóż węglowodorów, zawodnionych horyzontów i wybranych warstw wodonośnych na podziemne magazyny gazu ziemnego. Ministerstwo Środowiska. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr inw. 145/2005].

GÓROWSKA K., 2015 – Kawerna dla wodoru. Energetyka Cieplna i Zawodowa, 2: 80–84.

GOULART M.B.R., MAIA DA COSTA P.V., MAIA DA COSTA A., MIRANDA A.C.O., MENDES A.B., EBECKEN N.F.F., MENEGHINI J.R., NISHIMOTO K., ASSI G.R.S., 2020 – Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in Brazil, International Journal of Greenhouse Gas Control; doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103083.

GROTOWSKI A., MIZERA A., GROTOWSKA M., 1995 – Możliwości i warunki zagospodarowania odpadów powstających przy eksploatacji i przeróbce rud miedzi. *W*: Mat. Konf. „Problemy zagospodarowania odpadów mineralnych". Wisła, marzec 1995 r. AGOS SA, Katowice.

GRZYBOWSKI W., 2001 – Wykorzystanie podziemnych wyrobisk górniczych do składowania odpadów toksycznych i promieniotwórczych. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3: 27–31.

GUARASCIO M. (red.), 1998 – Guidleneis for Safety Assessment of Salt Caverns. SMRI Fall Meeting 1998, Rome, Italy.

GÜNTHER R., SALZER K., 2007 – A model for rock salt, describing transient, stationary, and accelerated creep and dilatancy. *W*: 6th conference on the mechanical behavior of salt – SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May.

GÜNTHER R., SALZER K., POPP T., 2010 – Advanced strain-hardening approach constitutive model for rock salt describing transient, stationary, and accelerated creep and dilatancy. *W:* 44th US rock mechanics symposium and 5th US-Canada rock mechanics symposium. American Rock Mechanics Association.

GÜNTHER R., SALZER K., POPP T., LÜDELING C., 2014 – Steady state-creep of rock salt—improved approaches for lab determination and modeling to describe transient, stationary and accelerated creep, dilatancy and healing. *W*: 48th US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.

HALL S.A., KENDALL J.M., BARKVED O.I., 2002 – Fractured reservoir characterisation using P-wave AVOA analysis of 3D OBC data. The Leading Edge, pp. 777–781.

HALLBAUER D.K., WAGNER H., COOL N.G., 1973 – Some observation concerning the microscopic and mechanical behavior of quarcite specimens in stiff, triaxial compression tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10: 713–726.

HALLSWORTH C.R., KNOX R.W.O.B., 1999 – Classification of sediments and sedimentary rocks. BGS Rock Classification Scheme, 3: 1–46.

HÁMOR-VIDÓ M., HÁMOR T., CZIROKAC L., 2021 – Underground space, the legal governance of a critical resource in circular economy. Resources Policy, 73; doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102171.

HAMPEL A., 2012 – The CDM constitutive model for the mechanical behavior of rock salt: Recent developments and extensions. *W*: Mechanical Behavior of Salt VII (red. P. Berest i in.): 45–55. CRC Press, Taylor and Francis Group, London.

HAMPEL A., SCHULZE O., 2007 – The composite dilatancy model: A constitutive model for the mechanical behavior of rock salt. *W:* 6th Conference on the mechanical behavior of salt-SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May.

HAMPEL A., SALZER K., GUNTHER R.-M., MINKLEY W., PUDEWILLS A., LEUGER B., ZAPF D., STAUDTMEISTER K., ROKAHR R., HERCHEN K., WOLTERS R., LUX K.-H., 2012 – Joint projects on the comparison of constitutive models for the mechanical behaviour of rock salt. II. Overview of models and results 3D benchmark calculations. *W*: Mechanical Behaviour of Salt VII (red. P. Berest i in.): 231–240. CRC Press, Taylor and Francis Group, London.

HEEMANN U., HEUSERMANN S., 2004 – Theoretical and experimental investigation on stresses and permeability in the BAMBUS project. *W*: DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal: 26–28.

HERRMANN A.G., KNIPPING B., 1993 – Waste Disposal and Evaporites. Contributions to Long-term Safety. Lecture Notes in Earth Sciences, 45: 1–193.

HEUSERMANN S., ROLFS O., SCHMIDT U., 2003 – Nonlinear finite element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. Computers & Structures, 81: 629–638.

HLADIK V., KOLEJKA V., LOJKA R., FOTT P., VACHA D., 2008 – CO_2 emissions and geological storage possibilities in the Czech Republic. Slovak Geol. Magazine: 29–41.

HOBLER M., 1977 – Badania Fizykomechanicznych własności skał. PWN, Warszawa.

HODBOD M., CZAPOWSKI G., 2018 – Sól kamienna/Rock salt. PIG-PIB, Warszawa.

HOEK E., 1999 – Putting numbers to geology – an engineer's viewpoint. „Felsbau" Rock and Soil Engineering. J. Eng. Geol., Geomechanics and Tunnelling, 3.

HOEK E., BROWN E.T., 1997 – Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal Rock Mechanics Mining Science, 34: 1165–1186.

HOU Z., 2003 – Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40: 725–738.

HOU Z., WUNDRAM L., MEYER R., SCHMIDT M., SCHMITZ S., WERE P., 2012 – Development of a long-term wellbore sealing concept based on numerical simulations and in situ-testing in the Altmark natural gas field. Environmental Earth Sciences, 67, 2: 395–409.

HOVORKA S.D., 2000 – Characterization of Bedded Salt for Storage Caverns — A Case Study from the Midland Basin, Texas. Bureau of Economic Geology, University of Austin, Texas, Geological Circular, GC0001, pp. 80.

HUBERT J.F., 1962 – A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. Journal of Sedimentary Research, 32, 3: 440–450.

HUNSCHE U.E., 1993 – Failure behavior of rock salt around underground cavities. *W*: Proceedings of the 7th symposium on salt: 59–65. Elsevier Science Publishers, New York.

HUNSCHE U.E., SCHULZE O., 1994 – Das Kriechverhalten von Steinsalz, Kali und Steinsalz, 11, 8/9: 238–255.

IEA GHG: CCS Site Characterisation Criteria. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009/10, July 2009, s. 130; https://www.globalccsinstitute.com/publications/ccs-site-characterisation--criteria.

IORDACHE I., SCHITEA D., GHEORGHE A.V., IORDACHE M., 2014 – Hydrogen underground storage in Romania, potential directions of development, stakeholders and general aspects. International Journal of Hydrogen Energy, 39, 21: 11071–11081.

IPCC, 2005 – Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press.

JAKUBICZ B., ŁOZIŃSKA W., 1989 – Zasady metodyczne opracowania map i atlasów geologiczno-inżynierskich obszarów zurbanizowanych i perspektywicznej zabudowy powierzchniowej. Instrukcje i Metody Badań Geologicznych, 49.

JANKOWSKA I., KWAŚNIAK M., 2015 – Rola dokładności wyznaczania konwergencji wyrobisk w aspekcie zagospodarowania pustek poeksploatacyjnych w kopalniach soli. *W*: Techniki inwentaryzacji i monitoringu obiektów inżynierskich (red. M. Kwaśniak): 32–43. Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej.

JANOHA A., KLUK D., 2006 – Zatłaczanie przefiltrowanych cieczy z odpadów wiertniczych do horyzontów chłonnych złóż węglowodorów. Nafta-Gaz, 3: 106−112.

JANSONS L., ZELTINS N., DAVIS A., SAVICKIS J., 2014 – The Latvian UGS Potential for Improvement of the EU's Security of the Natural Gas Supply: a Midterm Perspective. The 10th International Energy conference 26–27.08.2014, Tehran, Iran. World Energy Council.

JAROSIŃSKI M., 1994 – Metody pomiaru współczesnych naprężeń skorupy ziemskiej w głębokich otworach wiertniczych. Przegląd Geologiczny, 42, 7: 564–569.

JAROSIŃSKI M., 2005 – Współczesny reżim tektoniczny w Polsce na podstawie analizy testów szczelinowania hydraulicznego ścian otworów wiertniczych. Przegląd Geologiczny, 53, 10/1: 863–872.

JAROSIŃSKI M., 2006a – Recent tectonic stress field investigations in Poland: a state of the art. Geological Quarterly, 50, 3: 303–321.

JAROSIŃSKI M., 2006b – Źródła współczesnych naprężeń tektonicznych w Europie Środkowej w świetle modelowań elementami skończonymi. Przegląd Geologiczny, 54, 2: 700–709.

JAROSIŃSKI M., WÓJCICKI A., 2010 – Kwestie istotne dla konsultacji społecznych w sprawie podziemnego składowania dwutlenku węgla na terenie Polski. Przegląd Geologiczny, 58, 6: 482–489.

JAROSIŃSKI M., KRYŃSKI J., ROGOWSKI B., 2007 – Study of the relationship between the tectonic stress and the deformation of the lithosphere in the territory of Poland – a new geodynamic research project. Reports on Geodesy, 83, 2: 109–116.

JAROSIŃSKI M., BOBEK K., GŁUSZYŃSKI A., SOWIŻDŻAŁ K., SŁOCZYŃSKI T., 2023 – Fracture stratigraphy, stress and strain evolution in shale succession of the Lower Paleozoic Baltic Basin (Poland). AAPG Bulletin; doi:10.1306/10112221140.

JAROSZEWSKI W., MARKS L., RADOMSKI A., 1985 – Słownik geologii dynamicznej. Wydaw. Geol. Warszawa.

JASIŃSKI Z., 2000 – Podziemny system magazynowania paliw w kawernach solnych na przykładzie kopalni „Góra". Tech. Posz. Geol, Geosynopt. i Geotermia, 42, 223: 37–44.

JASIŃSKI Z., 2004 – Podziemny system magazynowania paliw w kawernach solnych. Górnictwo Odkrywkowe, 3/4: 62–69.

JASIŃSKI Z., MAZUR M., MROZIŃSKI P., 2013 – Budowa podziemnego Magazynu Ropy i Paliw „Góra" – przykład pomyślnego przekształcenia solankowych komór poeksploatacyjnych w kawerny magazynowe. Przegląd Solny (Salt Review), 9: 50–59.

JENYON M.K., 1986 – Salt with a pinch of water. Nature, 324: 515–516.

JOHNSON K.S., LUZA K.V., ROBERTS J.F., 1980 – Disposal of industrial wastes in Oklahoma. Oklahoma Geological Survey, 80; http://www.ogs.ou.edu/pubsscanned/ Circulars/circular80mm.pdf.

JURCZAK S., BRAŃKA S, BEREZOWSKI T., KASPRZYK W., ROGOWSKA E., 2006 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska złoża soli kamiennej Góra dla bezzbiornikowego magazynowania ropy naftowej i paliw płynnych w górotworze. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych Chemkop, Kraków.

JURECZKA J., CHEĆKO J., KRIEGER W., KWARCIŃSKI J., URYCH T., 2012 – Perspektywy geologicznej sekwestracji CO_2 w połączeniu z odzyskiem metanu z pokładów węgla w warunkach górnośląskiego zgłębia węglowego. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 448: 117–132.

JURKOWSKA A., ŚWIERCZEWSKA-GŁADYSZ E., BĄK M., KOWALIK S., 2019 – The role of biogenic silica in the formation of Upper Cretaceous pelagic carbonates and its palaeoecological implications. Cretaceous Research, 93: 170–187.

KALDI J.G., GIBSON-POOLE C.M., (red.), 2008 – Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterisation for CO_2 Storage Projects. Report No: RPT08-1001, CO2CRC, Canberra, ACT, AU.

KALISKI M., SIKORA A., 2013 – Wodór a podziemne magazynowanie energii w strukturach solnych. Przegląd Solny (Salt Review), 9: 26–32.

KALISKI M., JANUSZ P., SZURLEJ A., 2010 – Podziemne magazyny jako element zapewniający ciągłość dostaw gazu ziemnego. Wiertnictwo Nafta Gaz, 27, 1/2: 193–205.

KALISKI M., GROSS-GOŁACKA E., JANUSZ P., SZURLEJ A., 2013 – Magazynowanie gazu ziemnego w strukturach solnych, stan obecny, perspektywy rozwoju. Przegląd Solny (Salt Review), 9: 7–19.

KAPUŚCIŃSKI J., KOŁPACZYŃSKI M., 2018 – Projekt robót geologicznych w celu określenia warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich w związku z bezzbiornikowym magazynowaniem gazu w rejonie Marianowo, Etap 3, gm. Marianowo, Stara Dąbrowa, Stargard, pow. stargardzki, woj. zachodniopomorskie. Narod. Arch. Geol., Warszawa [nr inw. 6921/2018].

KARNKOWSKI P., 1993 – Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce. *W*: T. 2. Karpaty i zapadlisko przedkarpackie (red. W. Górecki). Towarzystwo Geosynoptyków „Geos" AGH, Kraków.

KARNKOWSKI P., CZAPOWSKI G., 2007 – Underground hydrocarbons storages in Poland: actual investments and prospects. Przegląd Geologiczny, 55, 12/1: 1067–1074.

KATZ D.L, TEK M.R., 1981 – Overview on underground storage of natural gas. Journal of Petroleum Geology, 33, 6: 943–951.

KATZ A.J., THOMPSON A.H., 1987 – Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 92(B1): 599–607.

KHALEDI K., 2017 – Constitutive modelling of rock salt with application to energy storage caverns. Ruhr-University at Bochum, Faculty of Civil and Environmental Engineering: Bochum.

KIDYBIŃSKI A., 2004 – Geotechniczne aspekty adaptacji wyrobisk likwidowanych kopalń węgla na podziemne magazyny gazu. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, 2: 37–63.

KIDYBIŃSKI A., SIEMEK J., (red.), 2006 – Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

KIJEWSKI P., KŁECZEK Z., 1998 – Głębinowe zatłaczanie technologicznych wód i ścieków. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 4, 3: 20–24.

KJØRHOLT H., 1991 – Gas tightness of unlined hard rock caverns. PhD, 1991:34. Trondheim: Norges Tekniske Høgskole.

KŁECZEK Z., ZELJAŚ D., 2004 – Lokalizacja podziemnego składowiska odpadów promieniotwórczych w Polsce. Przegląd Geologiczny, 52, 1/2: 649–652.

KŁECZEK Z., ZELJAŚ D., 2005 – Podziemne składowanie odpadów niebezpiecznych w Polsce aktualnym wyzwaniem dla inżynierii środowiska. Maszyny Górnicze, 23, 1: 42–48.

KŁECZEK Z., FLISIAK D., RADOMSKI A., 1994 – Koncepcja zagospodarowania złoża soli Lubińsko Głogowskiego Okręgu Miedziowego. Przegląd Górniczy, 50, 10: 5 11.

KŁECZEK Z., RADOMSKI A., ZELJAŚ D., 2005 – Podziemne magazynowanie. CMG KOMAG, Pr. Nauk. – Monogr., 9: 1–98.

KLEMCZAK O., BIEGAŃSKA J., 2009 – Charakterystyka materiałów zawierających azbest – opinie na temat oddziaływania rur azbestowo-cementowych. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowiska, 8, 1.

KLOJZY-KARCZMARCZYK B., MAZUREK J., 2017 – Propozycje rozszerzenia działań celem zagospodarowania materiałów odpadowych z górnictwa węgla kamiennego. Zeszyty Naukowe IGSiM PAN, 98: 151–166.

KLOJZY-KARCZMARCZYK B., MAZUREK J., STASZCZAK J., 2016 – Analiza jakości odpadów z nieczynnej hałdy górnictwa węgla kamiennego w odniesieniu do wymagań stawianym odpadom wydobywczym obojętnym. Zeszyty Naukowe IGSiM PAN, 95: 227–242.

KLUK D., 2011 – Badania procesu mieszania wód zatłaczanych z wodami złożowymi o zróżnicowanych potencjałach elektrochemicznych. Nafta-Gaz, 67, 2/: 98–106.

KLUK D., 2020 – Badania kompatybilności wód złożowych z utworów cechsztynu i czerwonego spągowca w aspekcie zatłaczania do warstw chłonnych. Nafta-Gaz, 7: 474–483; doi: 10.18668/NG.2020.07.06.

KNOTT T., 2003 – With a pinch of salt. Offshore Engineer, December 2003; http://www.oilonline. com/news/features/oe/20031203.With_a_p.13001.asp.

KOCHANEK E., 2007 – Podziemne magazynowanie paliw w strukturach geologicznych jako element bezpieczeństwa energetycznego Polski. Bezpieczeństwo Narodowe, 3/4: 302–311.

KOMAR P.D., 2007 – The entrainment, transport and sorting of heavy minerals by waves and currents. Developments in Sedimentology, 58: 3–48.

KOPERNA G.J. Jr, OUDINOT A.Y., MCCOLPIN G.R., LIU N., HEATH J., WELLS A., YOUNG G.B., 2009 – CO2-ECBM/Storage Activities at the San Juan Basin's Pump Canyon Test Site, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, October 2009; doi.org/10.2118/124002-MS.

KORNOWSKA I., 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym „DAMASŁAWEK", kat. rozpoznania C2, gmina: Żnin i Janowiec Wielkopolski, województwo: bydgoskie. 1–74. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr inw. 14611].

KORTAS G., 2001 – Konwergencja jako miara zaciskania wyrobisk komorowych. Przegląd Górniczy, 6: 23–29.

KORTAS G., 2004 – Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli. Instytut Mechaniki Górotworu, Wydaw. Inst. Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2016 – Składowanie i odzysk odpadów wtórnych z instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych w kopalni podziemnej. Inżynieria Ekologiczna, 49: 91–99.

KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2017 – Analiza SWOT odzysku odpadów w technologii wypełniania wyrobisk w kopalni soli. Przegląd Solny (Salt Review), 13: 156–160.

KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K., BARTŁOMIEJCZAK G., 2015a – Koncepcja podziemnego składowiska odpadów w Kopalni Soli „Kłodawa" S.A. Quo Vadis Sal: górnictwo solne: dokonania i perspektywy na początku XXI wieku: XX międzynarodowe sympozjum solne (red. G. Czapowski i in.): 24–25. Bochnia, 7–10.10.2015.

KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K., KULIK M., 2015b – Studium wykonalności składowania odpadów w pustkach poeksploatacyjnych Kopalni Soli „Kłodawa" S.A.". Mat. arch. Kopalni Soli „Kłodawa" S.A.

KORZENIOWSKI W., MIKOŁAJCZAK J., BOGACKI M., KOZAKIEWICZ R., POBORSKA-MŁYNARSKA K., STRYCZNIEWICZ L., KASIETCZUK M., 2016 – Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko polegającego na eksploatacji złoża soli kamiennej i potasowo-magnezowej ze złoża „Kłodawa 1" w celu uzyskania decyzji o uwarunkowaniach środowiskowych. Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze, Kraków.

KOSOWSKI P., STOPA J., RYCHLICKI S., 2007 – Podziemne magazynowanie gazu jako element systemu bezpieczeństwa energetycznego i rynku gazowego. Polityka Energetyczna, 10, 2: 131–140.

KOSOWSKI P., STOPA J., RYCHLICKI S., 2013 – Prognozy zapotrzebowania na podziemne magazynowanie gazu w Polsce na tle sytuacji bieżącej i scenariuszy rozwoju rynku gazowego. Rynek Energii, 5.

KOTARSKA I., 2012 – Odpady wydobywcze z górnictwa miedzi w Polsce – bilans, stan zagospodarowania i aspekty środowiskowe. Cuprum, 4, 65.

KOWALSKI W.C., 1988 – Geologia Inżynierska. Wydaw. PWN, Warszawa.

KOWIESKA J., KIEŁCZEWSKA J., 2019 – Zastosowanie piasków kwarcowych; http://surowce-naturalne.pl/zastosowanie-piaskow-kwarcowych.

KOZIOŁ W., UBERMAN R., 1996 – Możliwości i warunki zagospodarowania odpadów z górnictwa i energetyki w drogownictwie, zwłaszcza do budowy autostrad i dróg ekspresowych. Przegląd Geologiczny, 44, 7.

KRAJEWSKI R., 1984 – Terminologia i klasyfikacja masywów skalnych. Przegląd Geologiczny, 32, 12: 617–620.

KRÓL K., KUŚNIERZ B., 2019 – Bezzbiornikowe magazynowanie substancji w górotworze – techniczne i prawne aspekty działalności organów nadzoru górniczego. AGH Drilling, Oil, Gas, 36, 1: 5–18.

KRUMBEIN W.C., 1941 – Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research, 11, 2: 64–72.

KRZEMIEŃ A., SKIBA J., KOTERAS A., DUDA A., 2015 – Technologia produkcji metanu z pokładów węgla poprzez zatłaczanie CO_2 – przegląd doświadczeń uzyskanych w trakcie realizacji projektu CARBOLAB. Przegląd Górniczy, 1: 37–45.

KRZYWIEC P., 2009 – Geometria i ewolucja wybranych struktur solnych z obszaru Niżu Polskiego w świetle danych sejsmicznych. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 812–818.

KRZYWIEC P., ALEKSANDROWSKI P., FLOREK R., SIUPIK J., 2004 – Budowa frontalnej strefy Karpat zewnętrznych na przykładzie mioceńskiej jednostki Zgłobic w rejonie Brzeska–Wojnicza – nowe dane, nowe modele, nowe pytania. Przegląd Geologiczny, 52, 11: 1051–1059.

KUDELA S., 2014 – Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej na pograniczu Polski i Niemiec i ich znaczenie dla systemu energetycznego. *W*: XI polsko-niemiecka konferencja „Energetyka przygraniczna Polski i Niemiec – doświadczenia i perspektywy". Sulechów, 10.10.2014 r.; https://emo.kylos.pl/lubuska-energetyka.pl/images/lubuskaenergetyka/konferencja2014/prezentacje/3%20Slawomir%20Kudela-pl.pdf.

KUKIAŁKA P., 2014 – Złoża soli kamiennej w prowincji Alberta, Zachodnia Kanada. Przegląd Solny (Salt Review), 10: 132–136.

KUKIAŁKA P., 2015 – Kawerny solne w prowincji Alberta, Zachodnia Kanada. Przegląd Solny (Salt Review), 11: 83–90.

KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 1984 – Komputerowy model procesu ługowania podziemnych kawern w złożach soli: 267–279. Sympozjum Górnictwo Surowców Chemicznych - Zbiorniki Podziemne - Środowisko Naturalne. AGH, Kraków.

KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 1990 – Ubro – a Computer Model for Designing Salt Cavern Leaching Process – Developed at Chemkop, SMRI Fall 1990 Meeting, Paris October.

KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 2013 – Podziemne magazynowanie energii: wodór w kawernach solnych – aspekty ekonomiczne. Przegląd Solny (Salt Review), 9: 20–25.

KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2002 – Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju. Wydaw. AGH, Kraków, s. 145.

KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2009 – Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 819–828.

KUSHNIR R., ULLMANN A., DAYAN A., 2012 – Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: A review. Reviews in Chemical Engineering, 28: 123–148.

KWIECIEŃ J., 2009 – Technologia GIS w geologii inżynierskiej. Wydaw. Uczel. Uniwer. Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.

LABAUNE P., ROUABHI A., TIJANI M., BLANCO-MARTIN L., YOU T., 2018 – Dilatancy criteria for salt cavern design: a comparison between stress-and-train-based approaches, Rock Mech. Rock Eng., 51: 599–611.

LANGER M., 2001 – The role of the geological barrier in waste disposal projects. *W*: Engineering Geology and the Environment 4 (red. P.G. Marinos i in.), Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment: 3617–3636.

LANKOF L., 2018 – Klasyfikacja polskich złóż soli kamiennej w aspekcie magazynowania i składowania substancji. Studia, Rozprawy, Monografie – Polska Akademia Nauk. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią.

LANKOF L., TARKOWSKI R., 2020 – Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation. International Journal of Hydrogen Energy, 45, 38: 19479–19492.

LANKOF L., ŚLIZOWSKI J., SERBIN K., 2013 – Możliwości składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli kamiennej. Przegląd Solny (Salt Review), 9: 97–100.

LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GĄSKA K., WILKOSZ P., 2009 – Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 755–756.

LE DUIGOU A, BADER A-G, LANOIX J-C, NADAU L., 2017 – Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 22987–3003; doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.239.

LEE K.S., 2013 – Underground Thermal Energy Storage. Springer, London.

LEGINOWICZ A., 2014 – Anizotropia ośrodka geologicznego oraz jej wpływ na zarejestrowane dane sejsmiczne. Nafta-Gaz, 70, 9/2014: 584–598.

LEITH W., 2001 – Geologic and Engineering Constraints on the Feasibility of Clandestine Nuclear Testing by Decoupling in Large Underground Cavities. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Open file report 01-28, 56pp; http://geology.usgs.gov/open-file/2001.html; http://geology.er.usgs.gov/eespteam/EESPT_PUB.html.

LEPSZY S., CHMIELNIAK T., MOŃKA P., 2017 – Storage system for electricity obtained from wind power plants using underground hydrogen reservoir. Journal of Power Technologies, 97, 1: 61–68.

LETCHER M. (red.), 2016 – Storing Energy. With Special Reference to Renewable Energy Sources. Elsevier Inc.

LEVORSEN A.I., 1972 – Geologia ropy naftowej i gazu ziemnego. Wydaw. Geol., Warszawa.

LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA J., 2016 – zastosowanie wielokryterialnych modeli decyzyjnych do oceny potencjału struktur geologicznych. AHG, Kraków [pr. doktor.].

LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA J., TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., 2018 – Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland. International Journal of Hydrogen Energy, 43, 9: 4401–4414.

LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., KONOPKA E., 2009 – Ochrona naturalnych właściwości zbiornikowych górotworu jako składowiska odpadowych wód złożowych. Górnictwo i Geoinżynieria, 4, 33.

LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., WINID B., 2009 – Geologiczne aspekty chłonności otworów wykorzystywanych do podziemnego magazynowania odpadów. Wiertnictwo Nafta Gaz, 26, 3: 539–546.

LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., WINID B., 2011 – Geologiczne i geochemiczne aspekty chłonności otworów wykorzystywanych do zatłaczania wód złożowych. Rocznik Ochrona Środowiska, 13: 1985–2000.

LI J., SHI X., YANG C., LI Y., WANG T., MA H., 2018 – Mathematical model of salt cavern leaching for gas storage in high soluble salt formations. Nature Scientific Reports, 8, 372: 1–12.

LI J., TANG Y., SHI X., XU W., YANG C., 2019 – Modeling the construction of energy storage salt caverns in bedded salt. Applied Energy, Elsevier, 255.

LI J.L., SHI X.L., ZHANG S., 2020 – Construction modeling and parameter optimization of multi-step horizontal energy storage salt caverns. Energy, 203: 117840.

LIANG J., LINDBLOM U., 1995 – Analysis of gas storage capacity in unlined rock caverns. Rock Mechanics and Rock Engineering, 27, 3: 115–134.

LINDBLOM, U.E., 1989 – The Development of Hydrocarbon Storage in Hard Rock Caverns, 1989, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, and Geotechnical Engineering, Consultants Geocon AB, Goteborg, Sweden.

LISZKA K., 1982 – Podstawy eksploatacji złóż ropy. Skrypty uczelniane 869. Wydaw. AGH, Kraków.

LISZKOWSKI J., 1971 – Filtracyjne deformacje utworów lessowych. Biuletyn Geol. UW, 13: 87–129.

LIU W., ZHANG Z., FAN J., JIANG D., DAEMEN J.J.K., 2020a – Research on the Stability and Treatments of Natural Gas Storage Caverns With Different Shapes in Bedded Salt Rocks, in IEEE Access, 8, 18995–19007.

LIU W., ZHANG Z., LI J., CHEN J., 2020b – Investigation on the Deformation and Strength Characteristics of Rock Salt Under Different Confining Pressures. Geotechnical and Geological Engineering, 38: 5703–5717.

LIU W., JIANG D.Y., CHEN J., DAEMEN J.J.K., WU F., 2017 – Comprehensive feasibility study of two-well-horizontal caverns for natural gas storage in thinly-bedded salt rocks in china. Energy, 143, 15: 1006–1019.

LORD A.S., KOBOS P.H., KLISE G.T., BORNS D.J., 2011 – A life cycle cost analysis framework for geologic storage of hydrogen: a user's tool. 27. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories: 1–60.

LORD A.S., KOBOS P.H., BORNS D.J., 2014 – Geologic storage of hydrogen: scaling up to meet city transportation demands. International Journal of Hydrogen Energy, 39, 28: 15570–15582.

LUBAŚ J., SZOTT W., 2010 – 15-year experience of acid gas storage in the natural gas structure of Borzęcin – Poland. Nafta-Gaz, 66: 333–338.

LUBAŚ J., SZOTT W., WÓJCICKI A., 2015 – Wspomaganie wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego z polskich złóż z wykorzystaniem CO_2 i jego równoczesną sekwestracją. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 465: 45–56.

LUBAŚ J., SZOTT W., ŁĘTKOWSKI P., GOŁĄBEK A., MIŁEK K., WARNECKI M., WOJNICKI M., KUŚMIERCZYK J., SZUFLITA S., 2020 – Long-term sequestration process in the Borzęcin structure – observation evidence of the injected acid gas migration and possible leakage. Raport D2.2 projektu unijnego (H2020) SECURe (dostępny na stronie projektu: securegeoenergy.eu).

LUBOŃ K., 2020 – Ocena efektywności geologicznej składowania CO_2 w poziomach wodonośnych jury dolnej Niżu Polskiego. Studia, Rozprawy, Monografie, 211.

LUONG M.P., 1988 – Direct Tensile And Direct Shear Strengths Of Fontainebleau Sandstone. Key question in rock mechanics: Proceedings of the 29th US Symposium, Minneapolis, 13–15.04.1988: 237–246.

LUX K.H., 2009 – Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: Geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. Geological Society, London, Special Publications, 313, 1: 93–128.

LYNDON J., 1961 – The Legal Aspects of Underground Storage of Natural Gas – Should legislation be considered before the problem arises? 1 Alberta Law Review, 543.

ŁUKASZEWSKI P., 1996 – Ocena procesu pękania w wybranych skałach karbonu produktywnego przy zastosowaniu emisji akustycznej. Bibl. Wydz. Geol. UW [pr. doktor.].

ŁUKASZEWSKI P., 2002 – Zastosowanie emisji akustycznej do oceny przebiegu deformacji skał. *W*: Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej. Zeszyty problemowe. Badania nieniszczące: 237–240.

ŁUKASZEWSKI P., 2007 – Anizotropia wytrzymałości i odkształcalności piaskowców krośnieńskich z Mucharza w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Prace Naukowe Inst. Geotech. i Hydrotech. Pol. Wroc., 76, 42: 421–430.

ŁUKASZEWSKI P., 2013 – Odkształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężenia. Wydaw. UW, Warszawa, s. 222.

MACA N., 2016 – Geotermia niskich temperatur jako energia przyszłości. Termoaktywne konstrukcje inżynierskie jako narzędzie jej wykorzystania. *W*: Mat. konf. XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. 7–10 marca 2017 r., Wisła.

MACIEJEWSKI A., 2008 – Podziemne magazynowanie paliw płynnych. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24, 3/2: 39–53.

MACUDA J., 2010 – Środowiskowe aspekty produkcji gazu ziemnego z niekonwencjonalnych złóż. Przegląd Geologiczny, 58, 3.

MACUDA J., ZAWISZA L., 2006 – Techniczne uwarunkowania składowania odpadów płynnych w górotworze metodą otworową. Wiertnictwo Nafta Gaz, 23/1: 333–340.

MAJ A., 2009 – Opracowanie modelu konwergencji wyrobisk w podziemnych kopalniach soli. Kraków, AGH [pr. doktor.].

MAJ A., 2011 – Konwergencja w warunkach nieregularnie rozproszonych wyrobisk, na przykładzie kopalni Wieliczka. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 13, 1–4: 121–130.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M., (red.), 2021 – Wytyczne rozpoznania i badań podłoża budowlanego dla inwestycji kolejowych dużych prędkości. PIG-PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z., (red.), 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7). PIG-PIB, Warszawa.

MAJER E., ROGUSKI A., GRABOWSKA A., ŁUKAWSKA A., 2021a – Oznaczanie i opis gruntów drobnoziarnistych zgodnie z PN-EN ISO 14688-1:2018-05. Przegląd Geologiczny, 69, 12: 927–935.

MAJER E., ROGUSKI A., GRABOWSKA A., ŁUKAWSKA A., 2021b – Oznaczanie, opis i klasyfikacja gruntów według norm PN-EN ISO 14688-1 oraz 14688-2. Przegląd Geologiczny, 69, 12: 937–948.

MAJER E., ROGUSKI A., ŁUKAWSKA A., GRABOWSKA A., 2021c – Problematyka oznaczania i opisu gruntów według Eurokodu 7. Przegląd Geologiczny, 69, 12: 949–953.

MAKÓWKA J., MYSZKOWSKI J., MERTA G., 2019 – Określanie naprężeń pierwotnych w górotworze metodami hydarulicznymi – możliwości i zastosowania. Przegląd Górniczy, 7: 27–36.

MANGE M.A., MAURER H., 2012 – Heavy minerals in colour. Springer Science & Business Media.

MANGE M.A., MORTON A.C., 2007 – Geochemistry of heavy minerals. Developments in Sedimentology, 58: 345–391.

MANGE M.A., WRIGHT D.T., 2007 – High-resolution heavy mineral analysis (HRHMA): a brief summary. Developments in Sedimentology, 58: 433–436.

MARCAK H., PILECKI Z., 1998 – Geotechniczne aspekty składowania niebezpiecznych odpadów w wyrobiskach podziemnych. Przegląd Geologiczny, 46, 6: 542–546.

MARCZAK H., 2010 – Ocena zaciskania wyrobisk chodnikowych na podstawie pomiarów konwergencji. Postępy Nauki i Techniki, 4: 151–161.

MARCZAK H., 2012 – Wybrane aspekty badań wykorzystania podziemnych wyrobisk górniczych do składowania odpadów. Postępy Nauki i Techniki, 12: 181–189.

MARINOS P., HOEK E., 2000 – GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne: 1422–1442.

MARINOS P., MARINOS V., HOEK E., 2007 – The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses. Underground works under special conditions (red. M. Romana i in.). Proceedings of the ISRM Workshop W1, Madrid, Spain, 6–7.07.2007. Taylor and Francis.

MARKETOS G., SPIERS C.J., GOVERS R., 2016 – Impact of rock salt creep law choice on subsidence calculations for hydrocarbon reservoirs overlain by evaporate caprocks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 6: 4249–4267.

MARX H., LACK D., KRAUKE W., 2000 – Podsadzka podziemnych pustek odpadowymi materiałami przemysłowymi na przykładzie kopalni Glückauf Sonderhausen. Technika Poszukiwań Geologicznych, 42, 223: 69–73.

MARX H., LACK D., KRAUKE W., 2003 – The underground voids filling with waste on example of Glückauf Sondershausenmine. Technika Poszukiwań Geologicznych, 42, 5.

MARZEC P., PIETSCH K., KOBYLARSKI M., 2006 – wykorzystanie sejsmicznych przekrojów fal podłużnych i przemiennych do kalibracji modelu prędkości fal poprzecznych. Geologia, 32, 4: 419–440.

MATOS C.R., CARNEIRO J.F., SILVA P.P., 2019 – Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. Journal of Energy Storage 21: 241–258.

MAZUREK S., 2022 – Dodatek nr 3 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej „Kłodawa 1", gminy Kłodawa, Olszówka, pow. kolski, woj. wielkopolskie.

MCGOWN L.B., BOCKRIS J.O'M., 1980 – How to obtain abundant clean energy. Plenum Press, New York, London.

MENÉNDEZ J., ORDÓÑEZ A., ÁLVAREZ R., LOREDO J., 2019 – Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 108: 498–512.

MICHALSKI J., 2017 – Investment decisions in imperfect power markets with hydrogen storage and large share of intermittent electricity. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 13368–13381.

MICHALSKI J., BÜNGER U., CROTOGINO F., DONADEI S., SCHNEIDER G.S., PREGGER T., CAO K.-K., HEIDE D., 2017 – Hydrogen generation by electrolysis and storage in salt caverns: potentials, economics and systems aspects with regard to the German energy transition. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 13427–13443.

MICHAŁOWSKI W.S., TRZOP S., 2006 – Rurociągi dalekiego zasięgu. Wydawnictwo Odyssseum, Warszawa, s. 820.

MIECZNIK M., 2016 – Podziemne magazynowanie energii cieplnej – metody i zastosowania. Przegląd Geologiczny, 64, 7: 464–471.

MIKUŁA J., ŁACH M., MIERZWIŃSKI D., 2017 – Sposoby zagospodarowywania popiołów i żużli ze spalarni odpadów. Inżynieria Ekologiczna, 18, 3: 37–46; doi: 10.12912/23920629/68331.

MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., CZAPOWSKI G., SADŁOWSKA K., GĄSIEWICZ A., MARKOWIAK M., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., SZTROMWASSER E., KOŹMA K., SIKORSKA-MAYKOWSKA M., PAULO A., CHMIELEWSKI A., RADWANEK-BĄK B., GIEŁŻECKA-MĄDRY D., MĄDRY S., MICHNIEWICZ M., BUKOWSKI K., KUĆ P., BLIŹNIUK A., KOSTRZ-SIKORA P., PIOTROWSKA M., 2015 – Mapy obszarów perspektywicznych wystąpień rud metali i surowców chemicznych w Polsce w skali 1:200 000 wraz z ich oceną surowcową i ograniczeniami środowiskowymi i zagospodarowania przestrzennego. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr 1714/2015].

MIKULSKI S.Z., OSZCZEPALSKI S., CZAPOWSKI G., GĄSIEWICZ A., SADŁOWSKA K., MARKOWIAK M., SZTROMWASSER E., BUKOWSKI K., GIEŁŻECKA-MĄDRY D., MĄDRY S., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., PAULO A., MICHNIEWICZ M., RADWANEK-BĄK B., CHMIELEWSKI A., KUĆ P., SIKORSKA-MAJKOWSKA M., KOŹMAJ., BLIŹNIUK A., PIOTROWSKA M., KOSTRZ-SIKORA P., 2016 – Obszary i zasoby perspektywiczne wystąpień rud metali i surowców chemicznych w Polsce na mapach w skali 1:200 000 wraz z ich oceną surowcową oraz ograniczeniami środowiskowymi i zagospodarowania przestrzennego. Przegląd Geologiczny, 64, 9: 657–670.

MING L., 2010 – Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2, 4; doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00289.

MINKLEY M., MÜHLBAUER J., 2007 – Constitutive models to describe the mechanical behavior of salt rocks and the imbedded weakness planes. *W:* 6th conference on the mechanical behavior of salt-SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May.

MIZERSKA M., 2018 – Sole potasowo-magnezowe/Potassium-magnesium salts. PIG-PIB, Warszawa.

MOHR C.O., 1900 – Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 44: 1524–1530, 1572–1577.

MOLENDA J., 1996 – Gaz ziemny Paliwo i Surowiec. Wydaw. Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 586.

MORTON A.C., HALLSWORTH C., 1994 – Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 90, 3/4: 241–256.

MORTON A.C., HALLSWORTH C., 2007 – Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. Developments in sedimentology, 58: 215–245.

MORTON A., MCGILL P., 2018 – Correlation of hydrocarbon reservoir sandstones using heavy mineral provenance signatures: Examples from the North Sea and adjacent areas. Minerals, 8, 12.

MUNSON D.E., 1997 – Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 34, 2: 233–247.

MUNSON D.E., DAWSON P.R., 1981 – Salt-constitutive modeling using mechanism maps, Technical report, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (Stany Zjednoczone Ameryki); Cornell Univ., Ithaca, NY (Stany Zjednoczone Ameryki). Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering.

NAPIER J.A., PEIRCE A.P., 1995 – Simulation of extensive fracture formation and interaction in brittle materials. Proc. Mechanics of Jointed and Faulted Rock - JFR. Balkema, Rotterdam.

NAWROCKI J., BECKER A., (red.), 2017 – Atlas Geologiczny Polski. PIG-PIB, Warszawa.

NEAL J.T., MAGORIAN T.R., 1997 – Geologic site characterization (GSC) principles derived from storage and mining projects in salt, with application to environmental surety. Environmental Geology, 29, 3/4: 165–175.

NGUYEN D.Ch., KUBACKA T., FIGARSKI M., 2019 – Możliwości zastosowania echosondy CHEMKOP i kawernomierza wielkośrednicowego do badania kawern podziemnych. Przegląd Górniczy, 75, 4.

NORRIS S., 2019 – Multiple Roles of Clays in Radioactive Waste Confinement – Introduction. Geological Society, Special Publications, London, 482: 1–9; doi.org/10.1144/SP482-2019-4.

NORTON ENERGY, 2001 – Norton Energy Storage Receives Ohio Power Siting Board Approval for Construction of 2700 MW Compressed Air Energy Storage Facility. Norton Energy Press Release, May 21, 2001; http://www.caes.net/nortpres.html.

NORTON F.H., 1929 – The creep of steel at high temperatures, number 35, McGraw-Hill Book Company, Incorporated.

OBMIŃSKI A., 1997 – Odpady azbestowe – cz. I. Neutralizacja odpadów azbestowych na składowiskach – założenia ogólne. Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami. Sympozja i konferencje Nr 29. AGH i CPPGSMiE PAN, Rytro.

OKWANANKE A., ADEBOYE Y.B., SULAIMON L.A., 2011 – Evaluation and performance of natural gas storage in depleted gas reservoirs. Petroleum and Coal, 53, 4:324–332.

OLEK B., WOŹNIAK H., STANISZ J., 2014 – Metody statystyczne stosowane do wyznaczania parametrów geotechnicznych. Przegląd Geologiczny, 62, 10/2 :657–663.

OLSSON W.A., PENG S.S., 1976 – Microcrack nucleation in Marble. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 13. London.

ORSKA J., 1979 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kategorii C1 w wysadzie solnym. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa [nr inw. 6677/2021].

OSTROWSKI S., PACANOWSKI G., MAJER E., SOKOŁOWSKA M., (red.), 2022 – Badania geologiczno-inżynierskie. Geofizyka inżynierska. PIG-PIB, Warszawa.

PAJĄK T., 2017 – Nie od razu spalarnie zbudowano. Przegląd Komunalny, 9: 8–11.

PANFILOV M., 2016 – Underground and pipeline hydrogen storage. *W*: Compendium of hydrogen energy volume 2: hydrogen storage. Distribution and Infrastructure. A volume in Woodhead Publishing Series in Energy: 91–115. Elsevier Science & Technology.

PAPIERNIK B., 2014 – Kartowanie i modelowanie wgłębne do celów poszukiwań naftowych, podziemnego składowania dwutlenku węgla i geotermii w Polsce – rezultaty, narzędzia i potencjał. Przegląd Geologiczny, 62, 12: 856–861.

PAPIERNIK B., MICHNA M.A., 2010 – Modelowanie elementów geologicznego ryzyka składowania CO_2 z wykorzystaniem programu petrel na przykładzie analizy ryzyka strukturalnego antykliny Zaosia. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 439: 59–64.

PARCZEWSKI Z., 2008 – Wstępna ocena potencjalnych możliwości magazynowania CO_2 we wgłębnych strukturach geologicznych z uwzględnieniem uwarunkowań produkcji gazu ziemnego oraz PMG w Polsce w horyzoncie 2030 roku. Raport Cząstkowy 2. *W*: Raport 2030, Wpływ proponowanych regulacji unijnych w zakresie wprowadzenia europejskiej strategii rozwoju energetyki wolnej od emisji CO_2 na bezpieczeństwo energetyczne Polski, a w szczególności możliwości odbudowy mocy wytwórczych wykorzystujących paliwa kopalne oraz poziom cen energii elektrycznej. Polski Komitet Energii Elektrycznej i Badania Systemowe EnergSys Sp. z o.o.

PEITGEN H.O., JÜRGENS H., SAUPE D., 1995 – Granice chaosu, fraktale. PWN, Warszawa.

PETTIJOHN F., 1949 – Sedimentary rocks. Harper & Brothers, Publishers. New York.

PIEŃKOWSKI G., 2009 – Podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych w Polsce – wymiar strategiczny i możliwości poprawy stanu środowiska naturalnego. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 791–797.

PIEŃKOWSKI G., 2021 – CCS bezpieczną technologią niwelującą emisje CO_2. Prezentacja Forum Innowacyjności; https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/aktualnosci-2022/9063-ccs-bezpieczna-technologia-niwelujaca-emisje-co2/file.html.

PIESIK-BUŚ W., 2010 – Analiza modelu geologicznego wytypowanego złoża gazu ziemnego do konwersji na PMG, z wykorzystaniem CO_2 jako gazu buforowego. Nafta-Gaz, 66: 1000–1007.

PIESIK-BUŚ W., 2016 – Analiza przydatności wybranych złóż gazu ziemnego zapadliska przedkarpackiego do konwersji na PMG. Nafta-Gaz, 72: 95–101.

PIESIK-BUŚ W., ZAMOJCIN J., 2015 – Analiza przydatności wybranych złóż niecki zielonogórskiej do konwersji na PMG. Nafta-Gaz, 71: 185–189.

PIKUŁA M., WORSA-KOZAK M., CHUDY K., SZYMAŃSKI A., 2019 – Metody pomiarów hydrogeologicznych w głębokich otworach na przykładzie projektu I-More. CUPRUM – Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, 3, 92: 19–33.

PINIŃSKA J., 1980 – Wpływ wysokich temperatur na właściwości fizyczno-mechaniczne piaskowców krośnieńskich. Biul. Inst. Geol. Bad. Geol.-Inż., 9: 105–168.

PINIŃSKA J., 1992 – Emisja akustyczna ośrodków skalnych w stanach naprężeń pokrytycznych Przegląd Geoleologiczny, 40, 12: 727–733.

PINIŃSKA J. (red.), 1994 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał, cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego, t. 1. Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 99.

PINIŃSKA J. (red.), 1995 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego, t. 2. Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 171.

PINIŃSKA J. (red.), 1996 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. II. Skały magmowe, osadowe i metamorficzne regionu Sudetów. t. 3. Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 79.

PINIŃSKA J. (red.), 1997 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. II. Skały magmowe, osadowe i metamorficzne regionu Sudetów. t. 4, Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 296.

PINIŃSKA J. (red.), 1999 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. III. Jura Krakowsko-Częstochowska, t. 5, Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI, Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 79.

PINIŃSKA J. (red.), 2000a – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. III. Jura Krakowsko-Częstochowska, t. 6, Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 221.

PINIŃSKA J., 2000b – Klasyfikacja gruntów skalistych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Harmonizacja polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich": 117–133. Instytut Techniki Budowlanej.

PINIŃSKA J., 2000c – Od skały do gruntu – mechanizmy pękania w skałach: 201–210. Wydaw. Polit. Warszawskiej, Inst. Dróg i Mostów. Zakład Geotech. i Budowli Podziemnych; PAN, Warszawa.

PINIŃSKA J., 2000d – Wskaźnik mobilizacji emisji akustycznej jako efekt degradacji wytrzymałości skały: 353–362. Wydaw. Kat. Geomechaniki Górniczej i Geotechniki. AGH, Kraków.

PINIŃSKA J., 2001a – Ku wskaźnikowym ocenom geotechnicznej przydatności masywów skalnych. XXIV Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu: 395–404. Oficyna Wydaw. Politechniki Wrocławskiej. Wroclaw.

PINIŃSKA J., 2001b – Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych. Przegląd Geoleologiczny, 49, 9: 804–814.

PINIŃSKA J., 2002 – Zastosowanie badań nieniszczących w wytrzymałościowej klasyfikacji skał i masywów skalnych. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, 4: 81–95.

PINIŃSKA J. (red.), 2003 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe. t. 7. Katalog. Wydaw. Wyd. Geol. UW, Warszawa.

PINIŃSKA J., 2004a – Geoprzestrzenna integracja danych w inżynierii skalnej. *W*: Materiały konferencji XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Geotechnika i budownictwo specjalne: 225–234. Akademia Górniczo-Hutnicza.

PINIŃSKA J. (red.), 2004b – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe. t. 7, Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 215.

PINIŃSKA J., 2008 – Models of rock deformation under uniaxial compression conditions. Geologija, 50: 108–115 Supplement.

PINIŃSKA J. (red.), 2009 – Baza Danych Geomechanicznych Właściwości Skał. Zakł. Geomech. IHiGI, Wyd. Geol. UW, Warszawa, s. 101.

PINIŃSKA J. (red.), 2011 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał Polski na dużych głębokościach w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Zakł. Geomech. IHiGI, Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 193.

PINIŃSKA J., 2017 – Geotechniczne badania wytrzymałościowe skał w świetle PN-EN ISO 14689-1 oraz EC7, 2017. *W*: Mat.

Konf. XXXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji Wisła, 7–10 marca 2017 r., t. II: 137–150.

PINIŃSKA J., DZIEDZIC A., 2004 – GIS application for geomechanics – a Polish example. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 63, 1: 83–87.

PINIŃSKA J., DZIEDZIC A., (red.), 2006 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. V. Region lubelski, t. 9, Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI. Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 97.

PINIŃSKA J., DZIEDZIC A., (red.), 2007 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. V. Region lubelski, t. 10, Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI. Wydaw. Geol. UW, Warszawa, s. 189.

PINIŃSKA J., ŁUKASZEWSKI P., DZIEDZIC A., DOMONIK A., 2008 – Potrzeba integracji właściwości wytrzymałościowych skał – Baza Danych Geomechanicznych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 429: 139–144.

PISIEWICZ T., 2018 – Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej Lubień, miejsc. Lubień Kujawski, Wola Olszowa, Świerna, Czaple, Nowa Wieś, gmin, Lubień Kujawski, pow. włocławski, woj. kujawsko-pomorskie. 85. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, nr 6748/2018, Warszawa.

PISIEWICZ T., 2020 – Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej „Damasławek", miejsc. Sielec, Podobowice, Uścikowo, Ustaszewo, Świątkowo, Bogdarka, gm. Żnin, Janowiec Wielkopolski, pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie. Ss. 1164. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, nr 7190/2020, Warszawa.

PITIEWA K.E., 1976 – Hydrogeologiczne problemy podziemnego składowania ścieków przemysłowych. Przegląd Geologiczny, 24, 12.

PLAAT H., 2009 – Underground gas storage. Why and how. Geological Society, Special Publications, London, 313: 25–37; doi.org/10.1144/SP313.4.

PLEŚNIAK Ł., ORION-JĘDRYSEK M., JAKUBIAK M., BUCHA M., KRAJNIAK J., MATUSIEWICZ M., KUFKA D., MATYASIK I., JANIGA M., LOJEN S., ZIGON S., 2017 – Migration assessment of natural gas components in the Borzecin deposit based on results of hydrogen and carbon stable isotope analyzes. Nafta-Gaz, 73: 27–35.

PLEWA M., PLEWA S., 1992 – Petrofizyka. Wydaw. Geologiczne, Warszawa.

PLUCIŃSKA A., KROWIARZ M., KLEJNOWSKA A., PŁÓCIENNIK J., 2019 – Składowanie odpadów vs. podsadzanie wyeksploatowanych komór solankowych – potencjał i możliwości na przykładzie kopalni soli "Mogilno". Abstrakty XXIV Międzynarodowego Sympozjum Solnego QUO VADIS SAL pt. Kawerny solne jako element proekologicznej polityki energetycznej. Żnin, 9–11.10.2019: 30–40.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2000 – Przegląd możliwości wykorzystania podziemnych wyrobisk górniczych do magazynowania substancji użytecznych i składowania odpadów. Tech. Posz. Geol, Geosynopt. i Geotermia, 42, 223: 65–68.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2008 – Wstępna ocena możliwości składowania CO_2 w ługowniczych komorach solnych w Polsce. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 34, 3/2: 55–61.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2013 – Assessment of the Geological Environment in Respect of Waste Disposal in Salt Mine Workings. Geology, Geophysics i Environment, 39, 3: 223–232.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2018 – Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki. Przegląd Górniczy, 74, 6.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2022 – Geologiczno-górnicze warunki eksploatacji złóż w kopalniach podziemnych w wysadach solnych Polski środkowej. Wydaw. Nauk. AGH, Kraków.

POBORSKA-MŁYNARSKA K., KORZENIOWSKI W., 2015 – Model koncepcyjny trzystopniowej izolacji w podziemnym składowisku odpadów w wysadzie solnym. Przegląd Solny (Salt Review), 11: 51–56.

POLITYKA ENERGETYCZNA POLSKI DO 2040 r., 2021 – Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa

PONIATOWSKA A., GÓRECKA-ANDRZEJEWSKA A.D., 2018 – Quarterly of environmental engineering and design, 170, 50; doi: 10.5604/01.3001.0012.7459.

POSZYTEK A., RYBAK-OSTROWSKA B., ŁUKASZEWSKI P., WŁODARCZYK M., 2020 – Gas trap stability in the Zechstein Limestone from the Rudna Copper Mine (SW Poland). International Journal of Earth Sciences; doi.org/10.1007/s00531-019-01813-8.

POSZYTEK A., ŁUKASZEWSKI, P., WŁODARCZYK M., 2021 – Anizotropia akustyczna w utworach wapienia cechsztyńskiego zachodnia Polska. Przegląd Geologiczny, 69, 6: 386–388; doi: 10.7306/2021.22.

POWERS M.C., 1953 – A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research, 23, 2: 117–119.

POZZI M., MZYK T., 2007 – Ocena wpływu na środowisko odpadów ulokowanych w wyrobiskach podziemnych kopalń w świetle modelowania hydrogeochemicznego. Górnictwo i Geoinżynieria, 31, 3/1: 461–474.

PROGRAM usuwania wyrobów zawierających azbest z terenu województwa mazowieckiego. PIG, Warszawa, 2006.

PROPERTIES of Compressed Air, 2007. *W*: Pneumatic Drives. Springer, Berlin, Heidelberg; doi.org/10.1007/978-3-540-69471-7_2.

PROTODYAKONOV M.M., 1962 – Methods of studying the strength of rocks, used in the U.S.S.R. Mining Research Proceedings of a Symposium Held at the University of Missouri, February, 1961, 1962, p. 649–668.

PROTODYAKONOV M.M., 1969 – Methods of determining the shearing strength of rocks. *W*: Mechanical properties of rocks (red. M.M. Protodyakonov i in.).

PRZYBYCIN A., ULIASZ-MISIAK B., ZAWISZA L., 2011 – Sposoby użytkowania górotworu na świecie i w Polsce. Przegląd Geologiczny, 59, 5: 417–425.

PTAK A., WĄTOR L., POTEMPA M., 2018 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki geologiczno-inżynierskie na potrzeby podziemnego składowania odpadów płynnych w horyzontach VII i VIIa złoża gazu ziemnego „Husów-Albigowa-Krasne". Stowarzyszenie Naukowe im. Stanisława Staszica, Kraków.

PUBLIKACJA 11/I – Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych – czerwiec 2021; https://www.prs.pl.

PUDEWILLS A., 2012 – Numerical simulation of coupled thermo-hydro-mechanical process in rock salt. *W*: Mechanical Behaviour of Salt VII (red P. Berest i in.). Taylor and Francis Group, London.

PYTEL W., 2018 – Modelowanie numeryczne i pomiary dołowe w badaniach stateczności wyrobisk górniczych prowadzonych w Zakładzie Mechaniki Górotworu KGHM CUPRUM – CBR. CUPRUM – Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, 4, 89: 97–116.

QUATTROCCHI F., BOSCHI E., SPENA A., BUTTINELLI M., CANTUCCIA B., PROCESIA M., 2013 – Synergic and conflicting issues in planning underground use to produce energy in densely populated countries, as Italy: Geological storage of CO_2, natural gas, geothermics and nuclear waste disposal. Applied Energy, 101; doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.028.

RADOMSKI A., 1994 – Wykorzystanie wyrobisk poeksploatacyjnych kopalń soli do składowania odpadów przemysłowych.

W: Mat. Kon. Nauk. „Nowe technologie w gospodarce złożami soli kamiennej w Polsce", Rytro, 24–26.10.1994: 85–91. OBRTG CHEMKOP, Kraków.

REINISCH R., 2000 – Wybrane, istotne aspekty podziemnych magazynów gazu (u progu XXI wieku). Wydaw. PLJ, Warszawa.

REITENBACH V., GANZER L., ALBRECHT D., HAGEMANN B., 2015 – Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. Environmental Earth Sciences, 73, 11: 6927–6937.

ROJEK J., 2007 – Modelowanie i symulacja komputerowa złożonych zagadnień mechaniki nieliniowej metodami elementów skończonych i dyskretnych. Prace IPPT IFTR Reports.

RUSSO A.J., 1981 – A solution mining code for studying axisymmetric salt cavern formation. Sandia Report SAND81-1231: 1–32.

RYCHLEWSKI P., JURASZ W., SIERANT J., 2014 – Fundamenty palowe – jako elementy instalacji pozyskującej energię cieplną z gruntu w instalacjach pomp ciepła – termopale. Inżynier Budownictwa, 113: 88–94.

RYŻYŃSKI G., BOGUSZ W., 2016 – City-scale perspective for thermoactive structures in Warsaw. Environmental Geotechnics, 3, 4: 280–290.

SABERIAN A., 1984 – SALGAS User's Manual, Volume 1 – Theories, Formulas i Program Description. SMRI Research Project Report No. 84-003-SMRI.

SADOWSKI A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., CZAPOWSKI G., 2007 – Koncepcja wykorzystania i zagospodarowania wyrobisk poeksploataycjncych Kopalni Soli „Kłodawa". *W*: Mat. Konf. Nauk. Warsztaty Górnicze z cyklu „Zagrożenia Naturalne w Górnictwie", Ślesin k. Konina, 4–6 czerwca 2007: 83–96. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

SCHADE H.W.J., 2008 – Reverse mining – The development of deep geologic isolation of hazardous (chemotoxic) waste in Germany and its inter- national prospects. *W*: Deep Geologic Repositories (red. N.T. Rempe). Geological Society of America. Series GSA Reviews in Engineering Geology, 19.

SCHUTJENS P., HEIDUG W., 2012 – On the pore volume compressibility and its application as a petrophysical parameter.; https://spgindia.org/spg_2012/spgp512.pdf.

SEDLACEK R., 1999 – Underground gas storage In Europe and central Asia; Study of the United Nation Economic Commission for Europe. (UN/EC) Oil Gas European Magazine 4.

SENI S.J., HOVORKA S.D., MULLICAN W.F., 1995 – Technical aspects of occurrence of salt in Texas. *W*: Suitability of Solution-Mined Caverns for Oil and Gas Waste Disposal (red. W.F. Mullican III): 1–18. Conference Proceedings, Bureau of Economic Geology, University of Austin, Texas.

SERBIN K., 2013 – Wpływ parametrów termodynamicznych procesu magazynowania gazu na pojemność kawerny w złożu soli kamiennej. AGH, Kraków [pr. doktor.].

SERBIN K., ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., NAGY S., 2015 – The influence of thermodynamic effects on gas storage cavern convergence. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 79: 166–171.

SHI X., LIU W., CHEN J., YANG C., LI Y., MA H., PENG H., WANG T., MA X., 2017 – Geological Feasibility of Underground Oil Storage in Jintan Salt Mine of China. Advances in Materials Science and Engineering; doi.org/10.1155/2017/3159152.

SIEMEK J., NAGY S., 2007 – Podziemne magazyny gazu ziemnego w wyeksploatowanych kopalniach węgla. Wiertnictwo Nafta Gaz, 27, 2: 857–868.

SKARŻYŃSKA K., 1997 – Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wydaw. Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków.

ŠLIAUPA S., LOJKA R., TASÁRYOVA Z., KOLEJKA V., HLADÍK V., KOTULOVÁ J. i in., 2013 – CO_2 storage potential of sedimentary basins of Slovakia, the Czech Republic, Poland and the Baltic States. Geological Quarterly, 57, 2: 219–232.

SMOLIK E., GEMBALCZYK J., 2007 – Bezpieczne usuwanie płyt azbestowo-cementowych z dachu budynku. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach 1, 3: 7–22.

SONE H., ZOBACK M.D., 2013 – Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks part 2: ductile creep, brittle strength, and their relation to the elastic modulus, Geophysics, 78: 393–402.

SØRENSEN B., 2007 – Underground hydrogen storage in geological formations, and comparison with other storage solutions. *W*: Hydrogen Power Theoretical and Engineering International Symp. Merida Technical University.

SOWIŻDŻAŁ K., SUCH P., LEŚNIAK G., SŁOTA-VALIM M., 2017 – Ocena wpływu właściwości petrofizycznych skał łupkowych na ich efektywność uszczelniania poziomów zbiornikowych i akumulacji złożowych. Nafta-Gaz, 10: 730–738; doi: 10.18668/ng.2017.10.02.

SPECIAL REPORT of the Intergovernmental Panel of Climate Change on Carbon Capture and Storage (IPCC SRCCS) 2007 – Cambridge University Press, Cambridge, Wielka Brytania; www.ipcc.ch/pub/reports.htm.

SPIERS C.J., SCHUTJENS P.M.T.M., BRZESOWSKY R.H., PEACH C.J., LIEZENBERG J.L., ZWART H.J., 1990 – Experimental determination of the constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *W*: Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics (red. R.J. Knipe, E.H. Rutter). Geological Society, Special Publication, 54: 215–227.

SPRAWOZDANIE, 2021 – Sprawozdanie z realizacji krajowego planu gospodarki odpadami 2022 za okres od dnia 1 stycznia 2017 r. do dnia 31 grudnia 2019 r. Minister Klimatu i Środowiska, Warszawa, październik 2021 r.

STAMM A., 1957 – Legal Problems in the Underground Storage of Natural Gas", Texas Law Review, 36: 161–185.

STAN bezpieczeństwa i higieny pracy w górnictwie w 2007 roku, 2008. Wyższy Urząd Górniczy, Katowice.

ŠŤASTNÝ L., 2018 – Konverze ropného ložiska na podzemní zásobník plynu – příklad PZP Dambořice. Diplomová prace, Ostrava.

STONE H.B.J., VELDHUIS I., RICHARDSON R.N., 2009 – Underground hydrogen storage in UK 313. Geological Society, Special Publications: 217–226.

STOPA J., KOSOWSKI P., 2006 – Czynniki wpływające na koszty podziemnego magazynowania gazu. Polityka Energetyczna, 9: 311–317.

STOPA J., RYCHLICKI ST., KOSOWSKI P., 2008 – Rola podziemnego magazynowania gazu w kawernach solnych. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 34, 3/2: 11–23.

SUCH P., 1998 – Analiza fraktalnej struktury przestrzeni porowej przy wykorzystaniu krzywych ciśnień kapilarnych otrzymywanych metodą porozytmetrii rtęciowej. Przegląd Geologiczny, 46, 11: 1186–1190.

SUCH P., 2000 – Studium badań przestrzeni porowej skał dla potrzeb geologii naftowej. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, 104: 1–96.

SUCH P., 2002 – Wykorzystanie porometrii rtęciowej w analizie przestrzeni porowej skał zbiornikowych. Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, 113.

SUCH P., 2020 – Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. Nafta-Gaz, 11: 794–798; doi: 10.18668/NG.2020.11.04.

SUCH P., LEŚNIAK, G., BUDAK, P., 2007 – Kompleksowa metodyka badania właściwości petrofizycznych skał. Prace Instytutu Nafty i Gazu, 142: 69–69.

SUCH P., DUDEK L., MROCZKOWSKA-SZERSZEŃ M., CICHA-SZOT R., 2015 – The influence of reservoir conditions on filtration parameters of shale rocks. Nafta-Gaz, 11: 827–832; doi: 10.18668/NG2015.11.03.

SUCH P., LEŚNIAK G., MROCZKOWSKA-SZERSZEŃ M., DUDEK L., CICHA-SZOT R., SPUNDA K., 2017 – Metodyka analizy przestrzeni porowej skał łupkowych. Instytut Nafty i Gazu – PIB, Kraków.

SYLWESTER M., DZIEWIŃSKA L., TARKOWSKI R., 2013 – Możliwości wykorzystania antyklin Choszczna i Suliszewa do podziemnego składowania CO_2. Przegląd Górniczy, 11.

SZOTT W., 2010 – Zastosowanie symulacji komputerowych do modelowania pracy podziemnych magazynów gazu w Polsce. Nafta-Gaz, 66, 5: 339–344.

SZPUNAR T., BUDAK P., 2002 – Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej oraz graniczne parametry eksploatacyjne komory magazynowej. Prace Instytutu Nafty i Gazu, 114.

SZPUNAR T., BUDAK P., 2005 – Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej w trójosiowym stanie naprężeń i odkształceń. Prace Instytutu Nafty i Gazu, 128.

SZPUNAR T., BUDAK P., 2020 – Zmiany parametrów mieszaniny gazu ziemnego z wodorem w trakcie eksploatacji komory magazynowej w kawernie solnej. Nafta-Gaz, 11: 799–806; doi: 10.18668/NG.2020.11.05.

SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M., (red.), 2022 – Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych Polsce wg stanu na 31.12.2021. PIG-PIB, Warszawa.

ŚLIZOWSKI J., 2006 – Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej. Studia, rozprawy, Monografie nr 137. PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Warszawa.

ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., (red.), 2011 – Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górniczych. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.

ŚLIZOWSKI J., LANKOF L., WOJTUSZEWSKA K., 2007 – Geomechaniczna ocena optymalnej głębokości komór magazynowych gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, 6, 154: 50–61.

ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., ŁACIAK M., LANKOF L., SERBIN K., 2017 – Efektywność magazynowania gazu ziemnego i wodoru w kawernach solnych. Przemysł Chemiczny, 96, 5: 994–998.

ŚLIZOWSKI K. (red.), 1998 – Analiza materiałów archiwalnych dotyczących struktur skalnych na Niżu Polskim pod kątem przydatności do lokalizacji głębokiego Składowiska Odpadów Promieniotwórczych (SOP), Arch. IGSMiE PAN.

ŚLIZOWSKI K., 2001 – Zasady magazynowania ciekłych odpadów w głębokich strukturach przepuszczalnych. Technika Poszukiwań technologicznych, Geosynoptyka i Geotermia, 6: 43−50.

ŚLIZOWSKI K., 2002 – Hydrogeologiczne i górnicze kryteria składowania ciekłych odpadów niebezpiecznych w głębokich strukturach przepuszczalnych. Technika Poszukiwań Geologicznych, 1/2: 29–36.

ŚLIZOWSKI K., LANKOF L., 2009 – Geologiczne uwarunkowania składowania wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych w złożach soli w Polsce. Przegląd Geologiczny, 57, 9: 829–838.

ŚLIZOWSKI K., KÖHSLING J., LANKOF L., 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. Studia, Rozprawy, Monografie, 129.

ŚLIZOWSKI K., BRZOSKA G., DUDAŁA J., GLIEWICZ-WOLTER J., JANECZEK J., KASPRZYK W., LANKOF L., ŁUKASZEWSKI P., OCHOJSKI A., PAWLIKOWSKI M., PINIŃSKA J., PRZEWŁOCKI K., ŚLIZOWSKI J., 2005 – Badania laboratoryjne zubrów (iłowców solnych) dla oceny możliwości składowania odpadów promieniotwórczych w polskich wysadach solnych. IGSMiE PAN, Kraków, s.107.

ŚLIZOWSKI K., BRAŃKA S., JAWOR E., LANKOF L., ŚLIZOWSKI J., MACIEJEWSKI A., MAZUR M., NEY R., PISIEWICZ T., ROGOWSKA E., URBAŃCZYK K., WIŚNIEWSKA M., 2006 – Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej. IGSMiE PAN, Kraków, s. 286. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa [nr 715/2006].

ŚLIZOWSKI K., WIŚNIEWSKA M., WOJTUSZEWSKA K., 2009 – Pojemność komór magazynownych gazu w pokładzie soli na monoklinie przedsudeckiej. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, 75.

TADYCH J, PLUCIŃSKA A., DROGOWSKI J., PARIBEK J., 2014 – Rozpoznanie budowy geologicznej złoża soli kamiennej „Mogilno I" na podstawie pomiarów georadarem otworowym – korzyści, oszczędności i bezpieczeństwo. Przegląd Solny (Salt Review), 10: 5–12.

TAJDUŚ A., CAŁA M., TAJDUŚ K., 2012 – Geomechanika w budownictwie podziemnym – projektowanie i budowa tuneli. Wydaw. AGH, Kraków

TARKOWSKI R., 2005 – Geologiczna sekwestracja CO_2. Studia Rozprawy Monografie, 132.

TARKOWSKI R., 2008 – CO_2 storage capacity of geological structures located within Polish Lowlands' Mesozoic formations. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management, 24, 4: 101–112.

TARKOWSKI R., 2017 – Prospectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. Int. J. Hydrog. Energy, 40, 46: 15952–15962.

TARKOWSKI R., 2019 – Underground hydrogen storage: characteristic and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 105: 86–94.

TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018 – Salt domes in Poland – potential sites for hydrogen storage in caverns. International Journal of Hydrogen Energy, 43: 21414–21427.

TARKOWSKI R., STOPA J., 2007 – Szczelność struktury geologicznej przeznaczonej do podziemnego składowania dwutlenku węgla. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 23, 1: 129–137.

TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., 2003 – Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla. Przegląd Geologiczny, 51, 5: 402–409.

TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., 2005 – Wybrane aspekty prawne podziemnego składowania dwutlenku węgla. Polityka Energetyczna, 8: 539–548.

TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., 2007 – Podziemne składowanie – sposób na dwutlenek węgla. Przegląd Geologiczny, 55, 8: 655–660.

TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., SZARAWARSKA E., 2005 – Monitoring podziemnego składowania CO_2. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 21, 2: 35–48.

TARKOWSKI R., MAREK S., ULIASZ-MISIAK B., 2009a – Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO_2 w rejonie Bełchatowa. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 25, 2: 37–45.

TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B., WÓJCICKI A., 2009b – CO_2 storage capacity of deep aquifers and hydrocarbon fields in Poland – EU GeoCapacity project results. Energy Procedia 1: 2671–2677.

TARNAWSKI M. (red.), 2020 – Badania podłoża budowli. PWN, Warszawa.

TCS Manual, 2022 – Thermal conductivity (TC) and Thermal diffusivity (TD) Scanner, instrukcja użytkowania; http://www.tcscan.de.

TECHNOLOGIA wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla (CCS) sposobem na złagodzenie zmian klimatu. Raport przygotowany na zlecenie Polskiej Konfederacji Pracodawców Prywatnych Lewiatan przy wsparciu funduszu brytyjskiego Ministerstwa Spraw Zagranicznych (Foreign & Commonwealth Office) – Strategic Programme Fund Low Carbon High Growth – promującego gospodarkę niskoemisyjną. Warszawa, 2009.

TER HEEGE J.H., De BRESSER J.H.P., SPIERS C.J., 2005 – Dynamic Recrystallization of Wet Synthetic Polycrystalline Halite: Dependence of Grain Size Distribution on Flow Stress, Temperature and Strain. Tectonophysics, 396, 1/2: 35–57.

THIEL K. (red.), 1989 – Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe, na przykładzie badań stoku Bystrzyca w Szymbarku. Pr. IBW PAN, 17: 91.

THOMS R.L., GEHLE R.M., 2000 – A brief history of salt cavern use (keynote paper). *W*: Proceedings of 8th World Salt Symposium (red. R.M. Geertman), part 1: 207–214. Elsevier B.V.

TOMASKO D., ELCOCK D., VEIL J., CAUDLE D., 1997 – Risk Analysis for disposing nonhazardous oil field wastes in salt caverns. Report prepared for U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Under Contract W-31-109-ENG-38, Argonne National Laboratory, University of Chicago, Argonne, Il; http://www.ead.anl.gov/pub/doc/saltrisk.pdf.

TUCKER M.E. (red.), 2001 – Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. John Wiley & Sons.

TURNER G., MORTON A.C., 2007 – The effects of burial diagenesis on detrital heavy mineral grain surface textures. Developments in Sedimentology, 58, 393–412.

TWARDOWSKA I., SZCZEPAŃSKA J., WITCZAK S., 1988 – Wpływ odpadów górnictwa węgla kamiennego na środowisko wodne. Ocena zagrożenia, prognozowanie, zapobieganie. Prace i Studia, 35.

ULEWICZ M., MACIEJEWSKI P., 2009 – Gospodarka zużytymi wyrobami zawierającymi rtęć. Zeszyty Naukowe WSOWL, 4, 154. Nauki Chemiczne.

ULIASZ-MISIAK B., 2008 – Ryzyko związane z geologicznym składowaniem CO_2. Politechnika Koszalińska. Wydawnictwo Uczelniane. Rocznik Ochrona Środowiska, 10: 623–632.

ULIASZ-MISIAK B., 2009 – Klasyfikacje pojemności i kryteria wyboru miejsc składowania CO_2. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 25: 97–108.

ULIASZ-MISIAK B., PRZYBYCIN A., 2016 – Present and future status of the underground space use in Poland. Environmental Earth Sciences, 75, 1430: 1–15.

ULUSAY R. (red.), 2014 – The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer, p. 293.

ULUSAY R., HUDSON J., (red.), 2007 – The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. ISRM Turkish National Group and the ISRM.

URAI J.L., SPIERS C.J., 2007 – The effects of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rock salt during long-term deformation. *W*: '6th conference on the mechanical behavior of salt- SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May.

URAI J.L., SPIERS C.J., ZWART H.J., LISTER G.S., 1986 – Weakening of rocksalt by water during long term creep. Nature, 324: 554–557.

URAI J.L., SCHLEDER Z., SPIERS C., KUKLA P.A., 2008 – Flow and Transport Properties of Salt Rocks. *W*: Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System (red. R. Littke i in.): 277–290. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

URBAŃCZYK K., 2016 – Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. Przegląd Solny (Salt Review), 12: 92–97.

URBAŃCZYK K., 2017 – Między teorią a praktyką (Proces ługowania kawern solnych cz. IV). Przegląd Solny (Salt Review), 15: 45–55.

URBAŃCZYK K., 2018 – Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III). Przegląd Solny (Salt Review), 14: 54–69.

VAN GESSEL S., LEYNET A., MULDER A., KOORNEEF J., HARCOUET-MENOU V., 2015 – ESTMAP Technical Support Document: Subsurface Data Specification. TNO, BRGM, ECOFYS, VITO, EC Project no.: ENER/C2/2014-640/S12.698827, p. 66.

VAN LOON A.T., MANGE M.A., 2007 – In situ'dissolution of heavy minerals through extreme weathering, and the application of the surviving assemblages and their dissolution characteristics to correlation of Dutch and German silver sands. Developments in Sedimentology, 58, 189–213.

VAN SAMBEEK L.L., RATIGAN J.L., HANSEN F.D., 1993 – Dilatancy of rock salt in laboratory tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 30, 7: 735–738.

VANGKILDE-PEDERSEN T., LYNG ANTHONSEN K., SMITH N., KIRK K., NEELE F., MEERVANDER B., LEGALLO Y., BOSSIE-CODREANU D., WÓJCICKI A., LE NINDRE I.-M., HENDRIKS C., DALHOFF F., CHRISTENSEN N.P., 2008 – GHGT-9 Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide – the EU GeoCapacity project, energy Procedia – Elsevier.

VASQUEZ M., TENGBORG, P., 2001 – Lined rock cavern: new developments for gas storage in lined rock caverns. Presentation at The Global Gas Village; The Case for Underground Gas Storage in Europe, ENERGYWISE, Paris.

VATTENFAL L., 1987 – Underground Storage in Solid Rock Caverns. Int. Gas Union (IGU) Committee A, Report of Sub-Committee A-II, Study A-II-3, Stockholm, Sweden.

VERNON R., O'NEIL N., PASQUALI R., NIEMINEN M., 2013 – Screening of prospective sites for geological storage of CO_2 in the Southern Baltic Sea. VTT Technology 101, Espoo; https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T101.pdf.

WAGNER R., 1995 – Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 146.

WARREN J.K., 2006 – Evaporates: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 1035.

WEATHERBY J.R., MUNSON D.E., ARGÜELLO J.G., 1996 – Three-dimensional finite element simulation of creep deformation in rock salt. Engineering Computations, 13, 8: 82–105.

WEIDINGER P., HAMPEL A., BLUM W., HUNSCHE U., 1997 – Creep behaviour of natural rock salt and its description with the composite model. Materials Science and Engineering: A, 234–236: 646–648.

WERYŃSKI B. (red.), 1994 – Katalog surowców odpadowych przydatnych do wykorzystania w przemyśle materiałów budowlanych. Arch. IMMB w Opolu, Opole.

WIĄCEK D., 2011 – Wodór jako paliwo przyszłości. Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 10.

WIECZOREK A., 2012 – Ocena możliwości wykorzystania techniki spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją fali do badania zawartości szkodliwych i kancerogennych metali ciężkich w produktach naftowych. Nafta-Gaz, 10, 68.

WILCZYŃSKI P., 2018 – Badania pełzania dolnopeleoziocznych łupków basenu bałtyckiego. II Ogólnopolskie Sympozjum Geointerdyscyplinarnych Metod Badawczych, ECEG w Chęcinach, 11–13.04.2018.

WILCZYŃSKI P., DOMONIK A., ŁUKASZEWSKI P., 2021 – Anisotropy of Strength and Elastic Properties of Lower Paleozoic Shales from the Baltic Basin, Poland. Energies, 14, 11: 2995; doi: 10.3390/en14112995.

WŁODEK T., 2012 – Wybrane aspekty techniczne rurociągowego transportu dwutlenku węgla. AGH Drilling, Oil, Gas, 29, 1: 323–335.

WÓJCICKI A., 2009 – Potencjał geologicznego składowania CO_2 w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Przegląd Geologiczny, 57, 2: 138–143.

WÓJCICKI A., NAGY S., 2014 – Aspekty prawne i merytoryczne związane z bezpieczeństwem składowania CO_2 w strukturach geologicznych. Energetyka, 1: 33–37.

WÓJCICKI A., NAGY S., LUBAŚ J., CHEĆKO J., TARKOWSKI R., 2013 – Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania (streszczenie). PIG-PIB, Warszawa (raport i całość opracowania końcowego dostępne na stronie PIG-PIB: https://skladowanie.pgi.gov.pl/).

WOJNAR W., BIENIASZ J., MALINOWSKA A., HEJMANOWSKI R., KWINTA A., 2013 – Projekt zagospodarowania złoża soli kamiennej „Bądzów". Wydz. Wiertn., Nafty i Gazu, AGH, Kraków.

WOJNICKI M., BIAŁY S., KUŚNIERCZYK J., SZUFLITA S., WARNECKI M., 2018 – Pomiary mikroprzepuszczalności oparte na zjawisku zanikania impulsu ciśnienia (*pressure pulse decay*). Nafta-Gaz, 74, 5: 356–364.

WOJTOWICZ M., JAROSIŃSKI M., 2019 – Reconstructing the mechanical parameters of a transversely-isotropic rock based on log and incomplete core data integration. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 115, 1: 111–120; doi:10.1016/j.ijrmms.2019.01.009.

WOJTOWICZ M., JAROSIŃSKI M., PACHYTEL R.W., 2021 – Unconfined compressive strength of Lower Paleozoic shales from the Baltic Basin (northern Poland). Geological Quarterly, 2021, 65, 2; doi: http://dx.doi.org/10.7306/gq.1603.

WOŁKOWICZ S., SMAKOWSKI T., SPECZIK S., (red.), 2011 – Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.XII 2009 r. PIG-PIB, Warszawa.

WOŹNIAK H., ZAWISZA L., 2011 – Geomechaniczna ocena masywu skalnego dla potrzeb bezzbiornikowego magazynowania gazu ziemnego na podstawie PMG Swarzów. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 446: 163–172.

WYSOKIŃSKI L., KOTLICKI W., GODLEWSKI T., 2011 – Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

WYSZOMIRSKI P., SZYDŁAK T., PICHNIARCZYK P., 2016 – Charakterystyka surowcowa wybranych kruszyw mineralnych. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, 96: 363–378.

WYSZOMIRSKI P., GAJEK M., SZYDŁAK T., ZAWADZKI T., 2021 – Surowiec ilasty stosowany w dawnych manufakturach fajansu w okolicy Opola. Materiały Ceramiczne, 73, 1.

WYTYCZNE badań podłoża budowlanego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1: Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie, Warszawa 2019.

ZANETTI A., MAZZUCCHELLI M., SINIGOI S., GIOVANARDI T., PERESSINI G., FANNING M., 2013 – SHRIMP U-Pb zircon Triassic intrusion age of the Finero mafic complex (Ivrea–Verbano Zone, Western Alps) and its geodynamic implications. Journal of Petrology, 54, 11: 2235–2265.

ZAWISZA A., 2013 – Wpływ wybranych regulacji UE na rozwój rynku magazynowania gazu ziemnego w Polsce. Geology, Geophysics and Environment, 39, 3: 267–277; doi 10.7494/geol.2013.39.3.267.

ZAWISZA L., WĄTOR L., WOŹNIAK H., 2011 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki dla potrzeb bezzbiornikowego magazynowania gazu ziemnego w horyzoncie cenomanu złoża gazu ziemnego Swarzów, Ośrodek Szkolenia i Rzeczoznawstwa Stowarzyszenia Naukowo-Technicznego Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków.

ZELJAŚ D., 2020 – Magazyny gazu ziemnego w cechsztyńskich formacjach solnych elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski. Przegląd Geologiczny, 68, 11: 824–832.

ŻERUŃ M., MAJER E., RYŻYŃSKI G., 2022 – Geotermia inżynierska – możliwości zastosowania technologii OZE w budownictwie. *W*: XXXVI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 28.06–1.07.2022 r.

ZHENG S., CORBETT P., RYSETH A., STEWART G., 2000 – Uncertainty in well test and core permeability analysis: A case study in fluvial channel reservoir, Northern North Sea, Norway. AAPG Bulletin, 84, 12: 1929–1954.

ZHOU M.F., YAN D.P., KENNEDY A.K., Li Y., DING J., 2002 – SHRIMP U–Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. Earth and Planetary Science Letters, 196, 1/2: 51–67.

ZIEMIANIN K., 2021 – Zastosowanie analizy planimetrycznej w badaniach geologicznych – eksperymenty i spostrzeżenia. Nafta-Gaz, 8: 499–511; doi: 10.18668/NG.2021.08.01.

ZOBACK M.D., 2007 – Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press.

ZOHRABIAN A., MAJOUMERD M.M., SOLTANIEH M., SATTARI S., 2016 – Techno-economic evaluation of an integrated hydrogen and power co-generation system with CO_2 capture. International Journal of Greenhouse Gas Control, 44: 94–103.

ZORSKI T., JARZYNA J., DERKOWSKI A., ŚRODOŃ J., 2013 – Geofizyka otworowa w dobie poszukiwań gazu w łupkach – przegląd metod pomiarowych. Przegląd Geologiczny, 61, 7: 424–434.

ZYCH M., WŁODARCZYK P., NOWAK M., KUBACKA T., GARDEŁA A., 2018 – System do pomiarów geofizycznych w wysadach solnych. Przegląd Elektrotechniczny, 94, 8: 140–145.

Strony internetowe (dostęp: 1.06.2023)

https://alwi-gazy.pl
https://bip.mos.gov.pl
https://cordis.europa.eu
https://cordis.europa.eu/project/id/256705/pl
https://cordis.europa.eu/project/id/OG.-00270-97/it
https://dane.gov.pl/pl
https://dm.pgi.gov.pl
https://dokumenty.pgi.gov.pl
https://geologia.pgi.gov.pl
http://geoportal.pgi.gov.pl
https://gis.pgi.gov.pl
https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/3-Hevin-Underground-Storage-H2-in-Salt.pdf
https://fuelcellsworks.com/news/u-s-is-building-salt-mines-to-store-hydrogen
https://inzynieria.com/
https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/
https://khk.krakow.pl/pl/
https://kkcg.com/cs/mnd-gas-storage
https://kkcg.com/cs/moravia-gas-storage
https://kkcg.com/upload/article/pr-gas-storage-damborice-27-6-2016-eng-09795.pdf
https://kobize.pl/
https://markozen.com/2021/04/17/massive-underground-storage-facility-outside-of-pittsburgh-in-limestone-cave-2/
https://otworywiertnicze.pgi.gov.pl/
https://pgegiek.pl/
https://pgegiek.pl/Ochrona-srodowiska/CCS/Instalacja-demonstracyjna-CCS
https://pgnig.pl/
https://pgnig.pl/pmg-wierzchowice
https://skladowanie.pgi.gov.pl/
https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/CO2/WynikiPrac/II-18ipods.pdf
https://stat.gov.pl/
https://unece.org/sites/default/files/2021-04/09_Serge_van_Gessel-Hydrogen_Storage_and_UNFC-UNECE_RM_Week-2021.pdf
https://www.airproducts.com
https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr
https://www.atlasobscura.com/places/bryan-mound-strategic-petroleum-reserve
https://www.cedigaz.org/underground-gas-storage-in-the-world-2021-status
http://www.co2geonet.com/home
https://www.conexus.lv/information-about-storage
https://www.daub-ita.de/en/tunnel-projects/deutschland/the-nuettermoor-underground-natural-gas-storage
https://www.eia.gov/naturalgas/archive/059195.pdf
https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/
https://www.enea.pl
https://www.energy.gov/
https://www.geostocksandia.com/geostock-sandia/expertise/
https://www.gses.de/untertage-deponie.html
https://www.kpluss.com/en-us/
https://www.kpluss.com/en-us/our-business-products/waste-management/
https://www.mnd-energystorage.cz/en/
https://www.ngi.no/
https://www.psgaz.pl/
https://www.rwe-gasstorage.cz/en/about-us/our-storages/haje
https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/salt-cavern
http://www.sloged.si/wp-content/uploads/zborniki%20sukljetovih%20dnevov/4/1.pdf
https://www.sueddeutsche.de/wissen/untertagedeponie-so-verschwindet-das-gift-unter-der-erde-1.620160
https://www.tcscan.de/downloads/TCS-Manual.pdf (version december 2022)
https://www.veolia.co.uk/
https://www.veolia.co.uk/sites/g/files/dvc1681/files/document/2015/04/Minosus_Brochure_PDF.pdf
https://www.vng-gasspeicher.de/en/storage_types
https://www.worldometers.info/gas/latvia-natural-gas/
https://www.wug.gov.pl/
https://www.xtraspace.co.za/blog/articles/five-of-the-worlds-biggest-underground-storage-spaces

Poradnik stanowi zbiór informacji i zaleceń w zakresie dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania, z wyłączeniem odpadów promieniotwórczych. Adresowany jest przede wszystkim do geologów inżynierskich, projektantów, inwestorów oraz przedstawicieli administracji geologicznej.

To rodzaj przewodnika określającego, w jaki sposób powinno się ustalać warunki geologiczno-inżynierskie na potrzeby obiektów podziemnego magazynowania i składowania, a także co powinny zawierać dokumentacje geologiczno-inżynierskie opracowywane dla tego typu obiektów w odniesieniu do obowiązujących przepisów i zaleceń branżowych.

Jest to kolejna pozycja z cyklu wydawniczego zasad dokumentowania geologiczno-inżynierskiego, udostępnionych na stronie internetowej https://geoportal.pgi.gov.pl/atlasy_gi/publikacje

Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa
tel. (+48) 22 45 92 000, biuro@pgi.gov.pl
pgi.gov.pl

ISBN 978-83-67567-41-1

Ministerstwo Klimatu i Środowiska

NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA i GOSPODARKI WODNEJ