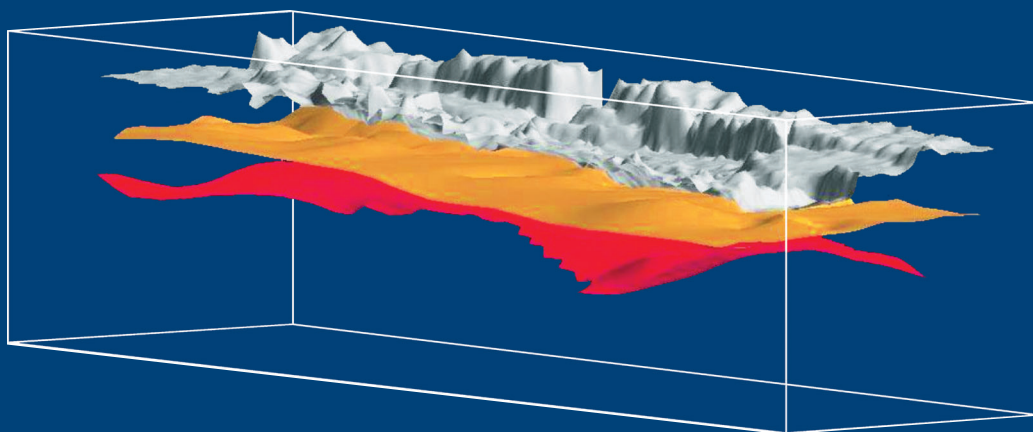


Schematyzacja warunków hydrogeologicznych na potrzeby numerycznego modelowania przepływu w JCWPd

pod redakcją

JANUSZA MICHALAKA, MARKA NAWALANEGO i ANDRZEJA SADURSKIEGO



Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Zespół autorski:

Bogusław KAZIMIERSKI, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Agnieszka KOWALCZYK, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Janusz MICHALAK, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Al. Żwirki i Wigury 93,
02-089 Warszawa

Grzegorz MORDZONEK, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Marek NAWALANY, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska,
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Zbigniew NOWICKI, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Andrzej SADURSKI, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Grzegorz SINICYN, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska,
ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa

Akceptował do druku dnia 4.03.2011 r.

Dyrektor ds. państwowej służby hydrogeologicznej
dr Lesław SKRZYPCZYK

Redakcja i projekt typograficzny: Elżbieta Gruszczyńska, Elżbieta Nauwaldt,
Anna Majewska

Projekt okładki: Wojciech Markiewicz

ISBN 978-83-7538-809-1

© Copyright by Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy,
Warszawa 2011

Druk ARGRAF Sp. z o.o., ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	7
2. Etapy prac nad schematami warunków hydrogeologicznych JCWPd	10
2.1. Metodyka opracowania schematów	11
2.2. Specyfikacje schematów JCWPd	23
2.2.1. Opis tekstowy opracowań pierwszego etapu, przedstawiający ogólną charakterystykę JCWPd	26
2.2.2. Wymagania dotyczące jednolitej formy specyfikacji drugiego etapu	26
3. Fizyczno-matematyczne podstawy modeli przepływu wód	30
3.1. Równania opisujące trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w skałach porowatych	30
3.1.1. Równanie ciągłości	31
3.1.2. Prawo zachowania pędu	32
3.1.3. Trójwymiarowe równanie przepływu wód podziemnych	33
3.2. Metody numeryczne	36
4. Typy modeli przepływu stosowanych do schematów warunków hydrogeologicznych	40
4.1. Równania modelu przepływu płaskiego wód podziemnych w skałach porowatych	40
4.1.1. Analog prawa Darcy dla modelu przepływu płaskiego	42
4.1.2. Zagadnienie przepływu płaskiego w warunkach przepływu o zwierciadle swobodnym	43
4.1.3. Różnice wartości współczynnika wodopojemności dla przepływów naporowych oraz przepływów o zwierciadle swobodnym	44
4.1.4. Dokładność bilansów wód podziemnych wyznaczanych na podstawie modelu przepływu płaskiego	44
4.2. Równania opisujące trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w ośrodkach anizotropowych lub/i niejednorodnych	46
4.3. Równania opisujące przepływ wód podziemnych w skałach szczelinowych	48
4.3.1. Model pojedynczego spękania	49
4.3.2. Model przepływu w ortogonalnej sieci spękań	52
4.3.3. Model przepływu w sieci równoległych i ciągłych spękań w skale porowatej	52

4.3.4. Model przepływu w losowej sieci spękań w skale porowatej	53
4.3.5. Model przepływu nieustalonego	54
4.4. Modele transportu masy	55
4.4.1. Adwekcja	55
4.4.2. Dyfuzja	56
4.4.3. Dyspersja	57
4.4.4. Prawo ciągłości	59
4.4.5. Równanie transportu masy w strumieniu wód podziemnych	59
4.4.6. Zagadnienie niepewności w modelach przepływu wód podziemnych i transportu masy w strumieniu wody podziemnej.	62
4.4.7. Metody oceny wpływu niepewności danych na wynik modelowania transportu zanieczyszczeń	64
5. Zasady schematyzacji warunków hydrogeologicznych JCWPd	71
5.1. Przestrenny model budowy geologicznej JCWPd	75
5.1.1. Metody opracowania schematu warunków hydrogeologicznych przy pomocy dedykowanego oprogramowania	76
5.2. Generalizacja elementów modelu przestrzennego.	80
5.2.1. Hydrogeologiczne wyróżnienia rozmyte	81
5.2.2. Hydrogeologiczne wyróżnienia ustanowione	82
5.3. Geometria wyróżnień ośrodka wodonośnego	84
5.3.1. Efekt proporcji geometrycznej w odniesieniu do przewodności warstw przepuszczalnych i słaboprzepuszczalnych	85
5.3.2. Metodyka interpolacji danych punktowych do siatki pokrycia macierzowego	87
5.4. Zapis zmienności parametrów środowiska przepływu wód podziemnych	88
5.5. Warunki brzegowe	89
6. Wykorzystanie metod geomatyki w opracowaniu danych opisujących schematy warunków hydrogeologicznych	92
6.1. Ogólne wymagania dotyczące struktur i form danych przestrzennych	95
6.1.1. Wymagania dotyczące danych wynikające z potrzeby ich przetwarzania z zastosowaniem systemów geoinformatycznych	108
6.1.2. Struktura organizacyjna zbiorów danych cyfrowych dla JCWPd	110
6.2. Metodyka zapisu danych w specyfikacjach warunków hydrogeologicznych	113
6.2.1. Zapis danych typu pokrycie w formie macierzowej	113
6.2.2. Zapis danych typu wyróżnienie w formie wektorowej	114
6.2.3. Zapis danych tekstowych z odniesieniem geoprzestrzennym	114
6.2.4. Definicje siatek dla danych typu pokrycie w formie macierzowej	118

6.3. Oprogramowanie do przetwarzania danych przestrzennych dla modeli	122
6.3.1. Przegląd systemów typu GIS	124
6.3.2. System GeoMedia Professional firmy Intergraph	126
7. Źródłowe zbiory danych	128
7.1. Zbiory danych hydrogeologicznych w dyspozycji państwowej służby hydrogeologicznej	130
7.2. Inne zbiory danych przestrzennych wykorzystywane w modelach przepływu	134
8. Podsumowanie	136
Literatura	138
Objaśnienia symboli	146
Słownik podstawowych terminów	148
Dodatek A. Szablon tekstu specyfikacji	158
Dodatek B. Przykłady definicji układu ETRS89/Poland CS92	160
Dodatek C. Szablon dla metadanych	169

1. WSTĘP

Schematyzacja warunków hydrogeologicznych jest stosowana w badaniach już od ponad stu lat. Aktualnie jest jednym z ważniejszych etapów konstrukcji matematycznych modeli filtracji i transportu masy. Stosuje się ją również w badaniach jednolitych części wód podziemnych (JCWPd), w szczególności w ocenie wpływu warunków środowiskowych, w tym oddziaływań gospodarki, na obieg i skład chemiczny wód; w organizacji sieci monitoringu i interpretacji jego wyników oraz w ocenie działań podejmowanych w celu ograniczenia negatywnych oddziaływań na wody podziemne i gleby.

W Ramowej Dyrektywie Wodnej UE – RDW (*Water Framework Directive – WFD*) (EP & CEU, 2000) wprowadzono i zdefiniowano pojęcie jednolitych części wód podziemnych – JCWPd (*Groundwater body*) przede wszystkim w celu określenia obszaru, na którym jest oceniany aktualny stan chemiczny i ilościowy oraz gdzie jest konieczne podejmowanie działań prowadzących do poprawy stanu i ochrony zasobów wód podziemnych. Działania te są ujmowane w sporządzanych dla okresów sześcioletnich planach gospodarowania wodami w dorzeczech. JCWPd nie są jednakże obszarami bilansowania i określania oraz rozdysponowywania zasobów wód podziemnych – w tym celu wyznaczono obszary wodno-gospodarcze (jednostki bilansowo-zasobowe).

Modele pojęciowe i opracowywane schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd mają służyć programowaniu i realizacji monitoringu JCWPd, interpretacji jego wyników w celu określania stanu chemicznego i ilościowego wód podziemnych, wyznaczaniu działań w zakresie ochrony, a w razie potrzeby – poprawy stanu wód podziemnych. Wszystkie te działania są ujmowane w planach gospodarowania wodami w dorzeczech. W szczególnie skomplikowanych przypadkach, np. gdy: a) mamy do czynienia z JCWPd o stwierdzonym stanie słabym, b) analiza oddziaływań presji gospodarki na wody podziemne JCWPd wykazuje zagrożenie nieosiągnięcia dobrego stanu w perspektywie 2016 r., c) JCWPd jest graniczną lub transgraniczną częścią wód, może okazać się, że analizy i oceny wykonywane za pomocą modeli pojęciowych – schematu warunków hydrogeologicznych są niewystarczające. Wtedy należy korzystać z pomocy bardziej zaawansowanego narzędzia, jakim jest matematyczny model filtracji lub transportu masy. Wtedy schemat warunków hydrogeologicznych będzie wykorzystany jako podstawa budowy takiego modelu. Potrzeba, a nawet konieczność stosowania modeli i schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd wynika z przepisów prawa europejskiego i prawa polskiego: dyrektyw 2000/60/WE, 2006/118/WE, ustawy Prawo wodne oraz dokumentów technicznych Komisji Europejskiej (*Guidance document* No. 2, 3, 7, 15, 16, 26).

Poprawne opracowanie schematu warunków hydrogeologicznych jest zadaniem trudnym i wymagającym przeprowadzenia wielu różnorodnych analiz relacji przestrzennych pomiędzy czynnikami kształtującymi te warunki a elementami wyrażającymi stan systemu wodonośnego. W takich przypadkach najskuteczniejszą metodą jest analiza danych geoprzestrzennych zapisanych w formie cyfrowej. Wymownym tego przykładem, obecnie już historycznym, była radykalna zmiana koncepcji dotyczącej warunków panujących w poziomie oligoceńskim niecki mazo-

wieckiej. Pierwotny, ugruntowany przez wiele lat i opisywany w literaturze pogląd dotyczący warunków panujących w tej jednostce zakładał, że zasilanie odbywa się na jej południowych krańcach – na wysoczyznach środkowej Polski, a strefy drenażu leżą na jej północno-zachodnim brzegu. W 1973 r. w Zakładzie Hydrologii i Hydrauliki Wód Podziemnych Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego podjęto pierwsze badania modelowe tej jednostki hydrogeologicznej. Zanim jeszcze uzyskano pierwsze wyniki z modelu, wstępna analiza przygotowanych danych wyraźnie wskazywała, że dotychczasowa koncepcja dotycząca warunków hydrogeologicznych tam panujących jest niepoprawna i nie jest możliwe odtworzenie stanu hydrodynamicznego przy założeniach wynikających z tej koncepcji. W tej sytuacji koniecznością było przyjęcie hipotezy, że zasilanie i drenaż tego poziomu wodonośnego jest możliwe w wielu miejscach i wymaga uwzględnienia pionowych przepływów także poprzez leżącą wyżej formację osadów płoceńskich.

Powyższy przykład jest tylko jednym z wielu argumentów przemawiających za potrzebą opracowania schematu warunków przy pomocy danych geoprzestrzennych w postaci cyfrowej. Także wiele innych argumentów przemawia za takim podejściem, m.in. powszechne stosowanie modeli numerycznych przepływu wody podziemnej, które wymagają danych w formie cyfrowej, i nowe inicjatywy Unii Europejskiej dotyczące danych geoprzestrzennych (z zakresu środowiska – dyrektywa INSPIRE i z zakresu wód powierzchniowych i podziemnych – Ramowa Dyrektywa Wodna). Biorąc to pod uwagę oraz uwzględniając fakt, że opracowane w pierwszym etapie schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd (nazywane tam modelami pojęciowymi JCWPd) mają postać opracowań tekstowych z graficznymi ilustracjami, przyjmuje się, że w drugim etapie prac główny wysiłek powinien być skierowany na zebranie wszelkich istotnych danych w formie cyfrowej, a w przypadku innej („papierowej” lub „analogowej”) formy – na przetworzenie potrzebnych danych do formy cyfrowej. Jest to podstawowe założenie metodyczne tego Informatora, które pozwoli na dalsze efektywne prace dotyczące tych zagadnień.

Kluczowymi technicznymi dokumentami wykonawczymi Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW), określającymi zakres i sposób pozyskiwania, przetwarzania, przechowywania i udostępniania danych dotyczących schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd, są dwa opracowania zespołu roboczego GIS (Working Group 3.1 – GIS):

- *Guidance Document No. 9 – Implementing the Geographical Information System Elements (GIS) of the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (WFD WG GIS, 2003a).*
- *Guidance Document No. 22 – Updated Guidance on Implementing the Geographical Information System (GIS) Elements of the EU Water policy. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (EC, 2009).*

Oba te dokumenty stanowią podstawę przedstawionych w tym Informatorze zaleceń dotyczących danych w formie cyfrowej, określających schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd. Pierwszy pochodzi z okresu wstępnych prac nad implementacją RDW (Kazimierski, Sadurski, 2005) i wyznacza ogólną ramę, a także zarysowujące się w tamtym czasie tendencje dotyczące tych zagadnień. Drugi, nowy dokument opublikowany w 2009 r., jest rozszerzeniem i uściśleniem poprzedniego – uwzględnia nową sytuację, jaka zaistniała w związku z implementacją dyrektywy INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) (EP&CEU, 2007) i budową Europejskiego Systemu Informacji o Wodach (WISE – *Water Information System for Europe*) (EC EDG, 2010). Prawie 100% informacji o wodach, w tym także podziemnych, jest przypisane do określonych miejsc na Ziemi – jest informacją geoprzestrzenną, często także określaną w skrócie jako informacja przestrzenna lub geoinformacja. Znalazło to także swój wyraz w obu wymienionych powyżej dokumentach, głównie w odniesieniu do wód powierzchniowych,

jednak z treści tych dokumentów jednoznacznie wynika, że te same zasady dotyczą danych z zakresu wód podziemnych. Na podkreślenie zasługuje ściśle powiązanie zakresu tematycznego danych, ich struktur i form zapisu stosowanych w obu inicjatywach europejskich. Zaleca się, aby w projektach z tego zakresu realizowanych w krajach członkowskich również były uwzględniane takie lub zbliżone do nich założenia, dotyczące danych geoprzestrzennych z zakresu środowiska, w tym wód (także podziemnych). Wymóg ten jest podyktowany koniecznością współdziałania (interoperacyjności) systemów geoinformatycznych przechowujących, przetwarzających i udostępniających dane dotyczące tej problematyki. Obok wymienionych powyżej dwóch technicznych dokumentów RDW, w Informatorze uwzględniono także opisane w literaturze doświadczenia z tego zakresu, zdobyte przy realizacji podobnych przedsięwzięć w innych krajach członkowskich Unii Europejskiej. Należy do nich zaliczyć prace prowadzone w: Szkocji i Irlandii Północnej (SNIFFER, 2004), Hiszpanii (Latre i in., 2004), Irlandii (Lawlor i in., 2003; GSI, 2010), Grecji (Stamou i in., 2004), Belgii (Cools i in., 2006), Portugalii (Bettencourt i in., 2003), Niemczech (Berkhoff, 2007) i Wielkiej Brytanii (Doherty, 2009). Interesujące wyniki uzyskano także w ramach międzynarodowego projektu, dotyczącego transgranicznej JCWPd na granicy Rumunii i Bułgarii (Karanjac i in., 2008).

2. ETAPY PRAC NAD SCHEMATAMI WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH JCWPd

Techniczne dokumenty wykonawcze Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW) określają proces opracowywania schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd jako wieloetapowy i cykliczny – w ramach kolejnych cyklicznie powtarzających się etapów schemat dla określonej JCWPd staje się coraz bardziej pełny, kompletny, wewnętrznie spójny i precyzyjny. Zostało to sugestywnie zilustrowane przez Scheidledera w raporcie technicznym, dotyczącym monitoringu JCWPd (fig. 2.1) (Scheidleder, 2004).

Dla większości polskich JCWPd pierwsze wstępne zarysy schematów warunków hydrogeologicznych są już opracowane lub prace nad nimi trwają. W niniejszym Informatorze są przedstawione zalecenia dotyczące drugiego etapu prac nad tymi schematami. Podstawowymi zadaniami na tym etapie jest zebranie w formie cyfrowej wszystkich danych dotyczących poszczególnych JCWPd i potrzebnych do opracowania schematów, a także przetworzenie tych danych z formy niecyfrowej do cyfrowej, jeżeli w formie cyfrowej nie są dostępne. Celem tych prac jest stworzenie możliwości przetwarzania danych do postaci pozwalającej na wykonywanie analiz przestrzennych systemów hydrogeologicznych, wchodzących w skład poszczególnych JCWPd. W różnych przypadkach dla różnych JCWPd opracowanie schematów warunków hydrogeologicznych może wymagać zastosowania różnych metod i różnych technologii bazujących na danych zapisanych w formie cyfrowej. W takich przypadkach mamy do dyspozycji wiele narzędzi badawczych, począwszy od prostego porównania przy pomocy oprogramowania geoinformatycznego (typu GIS) zasięgu przestrzennego elementów tworzących system hydrogeologiczny, poprzez metody określania podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia, aż do skomplikowanych symulacji na numerycznych modelach przepływu.

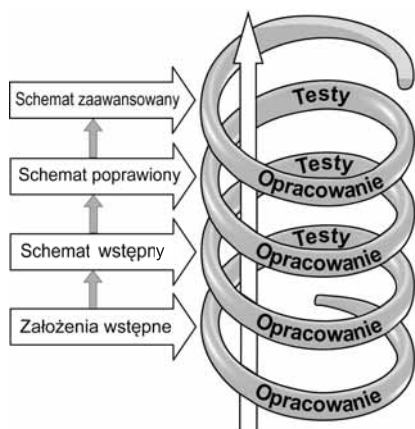


Fig. 2.1. Opracowanie schematu warunków hydrogeologicznych (*conceptual model of hydrogeological system*) jako proces cykliczny

W kolejnych etapach zasób informacji i wiedzy jest pełniejszy i dokładniejszy (Scheidleder, 2004, zmodyfikowane przez: Kazimierski, 2006)

Na obecnym etapie rozpoznania JCWPd trudno jest dokładnie określić, jakiego rodzaju analizy będą potrzebne w konkretnych przypadkach. Jednakże cyfrowa forma danych opisujących warunki hydrogeologiczne jest niezbędna w każdej sytuacji, ponieważ stosowane obecnie metody są oparte na przetwarzaniu realizowanym przez wyspecjalizowane oprogramowanie komputerowe.

Na obecnym etapie rozpoznania JCWPd trudno jest dokładnie określić, jakiego rodzaju analizy będą potrzebne w konkretnych przypadkach. Jednakże cyfrowa forma danych opisujących warunki hydrogeologiczne jest niezbędna w każdej sytuacji, ponieważ stosowane obecnie metody są oparte na przetwarzaniu realizowanym przez wyspecjalizowane oprogramowanie komputerowe.

2.1. Metodyka opracowania schematów

Wyniki prac pierwszego etapu określania schematów JCWPd mają postać opracowań tekstowych, często z bogatą ilustracją graficzną, co pozwala Czytelnikowi zapoznać się z głównymi problemami dotyczącymi poszczególnych JCWPd. Jednak bardziej szczegółowa analiza panującego tam stanu, czynników wpływających na ten stan i czasowej dynamiki zmian, jakie zachodzą lub mogą zajść w przyszłości, wymaga innego, bardziej technologicznie zaawansowanego podejścia.

Porównanie dwóch podstawowych dla niniejszego Informatora dokumentów technicznych RDW wyraźnie pokazuje, że po kilku latach prac nad implementacją dyrektywy istotnie zmienił się nie tylko zakres tematyczny danych dotyczących JCWPd i ich forma zapisu, ale także uległa zmianie stosowana tam terminologia. Z tego względu w Informatorze są stosowane nieco inne pojęcia niż te, które były używane w pierwszym etapie prac dotyczących JCWPd. Zestawienie wybranych najważniejszych terminów jest zawarte w słowniku umieszczonym na końcu Informatora. W tym miejscu trzeba jednak szerzej przedstawić podstawowy termin związany z tytułem Informatora: „schemat warunków hydrogeologicznych JCWPd”, zastępujący wcześniej stosowany termin „model pojęciowy JCWPd”. Anglojęzyczny termin „*conceptual model*” w zagadnieniach modelowania przepływu wód podziemnych jest często niefortunnie przypisywany jednemu konkretnemu wyróżnieniu przestrzennemu, np. określone modelowanemu systemowi hydrogeologicznemu. W innych dziedzinach i zastosowaniach termin ten dotyczy określonego typu wyróżnień (klasy obiektów lub kategorii elementów, egzemplarza, encji itp.) (fig. 2.2) (ISO/TC 211, 2005).

W celu dokładniejszego zapoznania się z problematyką terminologiczną dotyczącą tych zagadnień, można odesłać Czytelnika do publikacji Refsgaarda i Henriksena (2004). Schemat na figurze 2.3, pochodzący z tej publikacji, przedstawia wzajemne powiązania podstawowych pojęć.

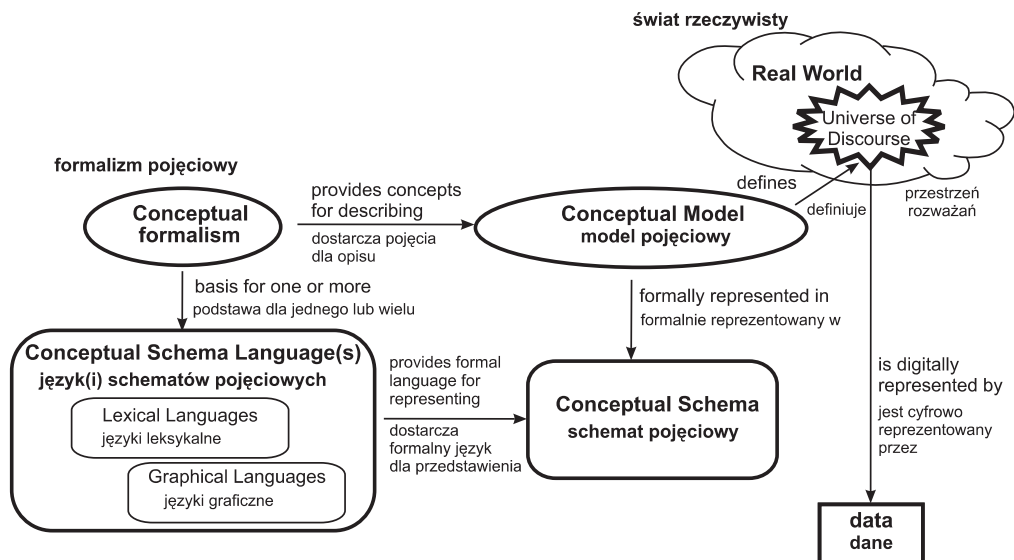


Fig. 2.2. Od rzeczywistości do schematu pojęciowego, opartego na pojęciowym formalizmie i języku schematów pojęciowych (ISO/TC211, 2005, z uzupełnieniami terminów polskich)

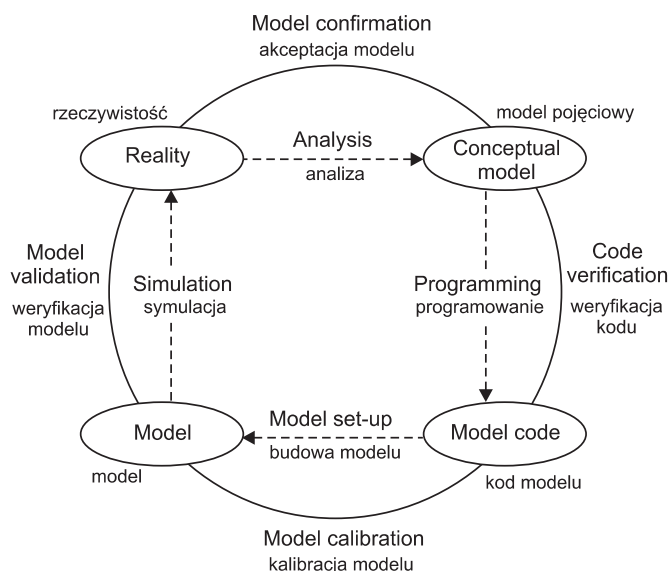


Fig. 2.3. Metamodel modeli hydrogeologicznych – podstawowe pojęcia z zakresu modelowania i zachodzące między nimi relacje (Refsgaard, Henriksen, 2004)

Z tego względu w Informatorze termin „model pojęciowy” w odniesieniu do systemów hydrogeologicznych jako ścisłe przetłumaczenie terminu „*conceptual model*” został zastąpiony stosowanym w Polsce od dawna terminem „schemat warunków hydrogeologicznych”, którego znaczenie w pełni pokrywa się z definicją podaną w dokumentach technicznych RDW (Kazimierski, 2006):

- (...) jest uproszczonym przedstawieniem lub opisem roboczym tego, jak uważa się, że zachowuje się rzeczywisty system hydrogeologiczny. Opisuje, jak zdaniem hydrogeologów zachowuje się system wód podziemnych.
- Jest to zbiór hipotez roboczych i założeń. Skupia się na cechach systemu, które są istotne w odniesieniu do wymaganych przewidywań lub opiera się na dowodach. Jest to przybliżenie rzeczywistości.
- Powinien być zapisany, żeby można go było przetestować przy użyciu istniejących i/lub nowych danych.
- Poziom udoskonalenia konieczny w modelu jest proporcjonalny do: a) trudności przy przyjmowaniu niezbędnych założeń lub przewidywań oraz b) potencjalnych skutków popełnienia błędów w tych założeniach.

Podstawowymi pojęciami stosowanymi przy cyfrowym zapisie schematów warunków hydrogeologicznych konkretnych systemów (także JCWPd), są:

1. Jednostka geologiczna – wyodrębniony fragment litosfery (skały lub lodu) o określonym składzie i pochodzeniu (często także wieku, petrografii, litologii lub charakterystyce paleontologicznej) tak zdefiniowanymi, że pozwalają na odróżnienie od otoczenia. Jednostka geo-

logiczna jest z reguły łatwo rozpoznawalna, odwzorowywana kartograficznie, chociaż jej granice nie muszą być ostre.

2. Jednostka hydrogeologiczna – fragment litosfery stanowiący przestrzennie i dynamicznie zdefiniowany system hydrogeologiczny (Dowgiałło i in., red., 2002). Można tu wyróżnić trzy kategorie:
 - jednostka hydrogeologiczna regionalna – obszarowa, ogólna nazwa jednostki taksonomicznej w regionalizacji hydrogeologicznej, np.: prowincja, region, subregion, obszar;
 - jednostka hydrogeologiczna hydrostratygraficzna, np. piętro wodonośne, poziom wodonośny;
 - jednostka hydrogeologiczna strukturalna – odpowiednik struktury hydrogeologicznej.
3. System hydrogeologiczny – wyodrębniony fizycznie fragment środowiska wód podziemnych.
4. Jednolita część wód podziemnych (JCWPd) – wydzielona objętość wody podziemnej wypełniającej poziom lub poziomy wodonośne (RDW). Uwzględniając pojęcia z tym związane można przyjąć, że woda ta jest częścią systemu hydrogeologicznego lub/i wypełnia jednostkę hydrogeologiczną. Zgodnie z nowymi wykonawczymi dokumentami technicznymi RDW, JCWPd nie musi być jednolita i może składać się z części. Jest to odstępstwo od zasady stosowanej do jednolitych części wód powierzchniowych i wynika z wielkiej złożoności systemów hydrogeologicznych oraz ze zmienności przestrzennej warunków w nich panujących.
5. Jednostka sprawozdawcza – obszar zajmowany przez jednostkę hydrogeologiczną, w której znajduje się jednolita część wód podziemnych (JCWPd) objęta procedurami sprawozdawczymi RDW. W ten sposób jednostkę sprawozdawczą definiuje się w specyfikacji danych INSPIRE, dotyczącej tematu „Gospodarowanie obszarem, strefy ograniczone i regulacyjne oraz jednostki sprawozdawcze”.

Pięć powyższych pojęć stanowi rdzeń złożonych modeli pojęciowych danych, a w szczególności modelu WISE dla RDW (EIONET, 2010), modeli języków GeoSciML i GWML, a także modeli określonych w specyfikacjach danych INSPIRE dla tematów „Hydrografia” i „Geologia”. Ogólne zarysy tych modeli są przedstawione w dalszej części przy pomocy języka UML (*Unified Modeling Language*), należącego do języków schematów pojęciowych (fig. 2.2). Na figurze 2.4 zaprezentowano podstawowe zasady notacji graficznej tego języka. Trzeba jednak podkreślić, że język UML nie jest jedynie notacją graficzną. Graficzne diagramy przedstawiają tylko najważniejsze elementy modelu (fig. 2.5A), a wiele szczegółów modelu pojęciowego nie jest na diagramach bezpośrednio widoczna. Aby je przeczytać lub edytować, oprogramowanie narzędziowe języka UML pozwala na otwarcie dodatkowego okna tekstowego (fig. 2.5B).

Struktury i formy zapisu danych geoprzestrzennych objętych dyrektywami RDW i INSPIRE, zgodnie z przyjętymi międzynarodowymi zasadami określonymi w specyfikacjach *Open Geospatial Consortium* i normach ISO dla zapewnienia interoperacyjności w zakresie danych i usług, są ujednolicone w skali międzynarodowej bez względu na różnice językowe w poszczególnych krajach. Podstawą do stosowania tych zasad w krajach członkowskich Unii Europejskiej jest rozporządzenie Komisji Europejskiej nr 1089/2010 z dnia 23 listopada 2010 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w zakresie interoperacyjności zbiorów i usług danych przestrzennych (Rozporządzenie..., 2010). W myśl tych zasad nazwy klas danych, typów danych, atrybutów i elementów występujące w zapisach w językach UML, XML i ich aplikacjach są słowami kluczowymi w sensie informatycznym, tzn. mają szczególne znaczenie i oznaczają określone rozkazy, instrukcje lub deklaracje (Subieta, 1999). Z tego względu w każdym

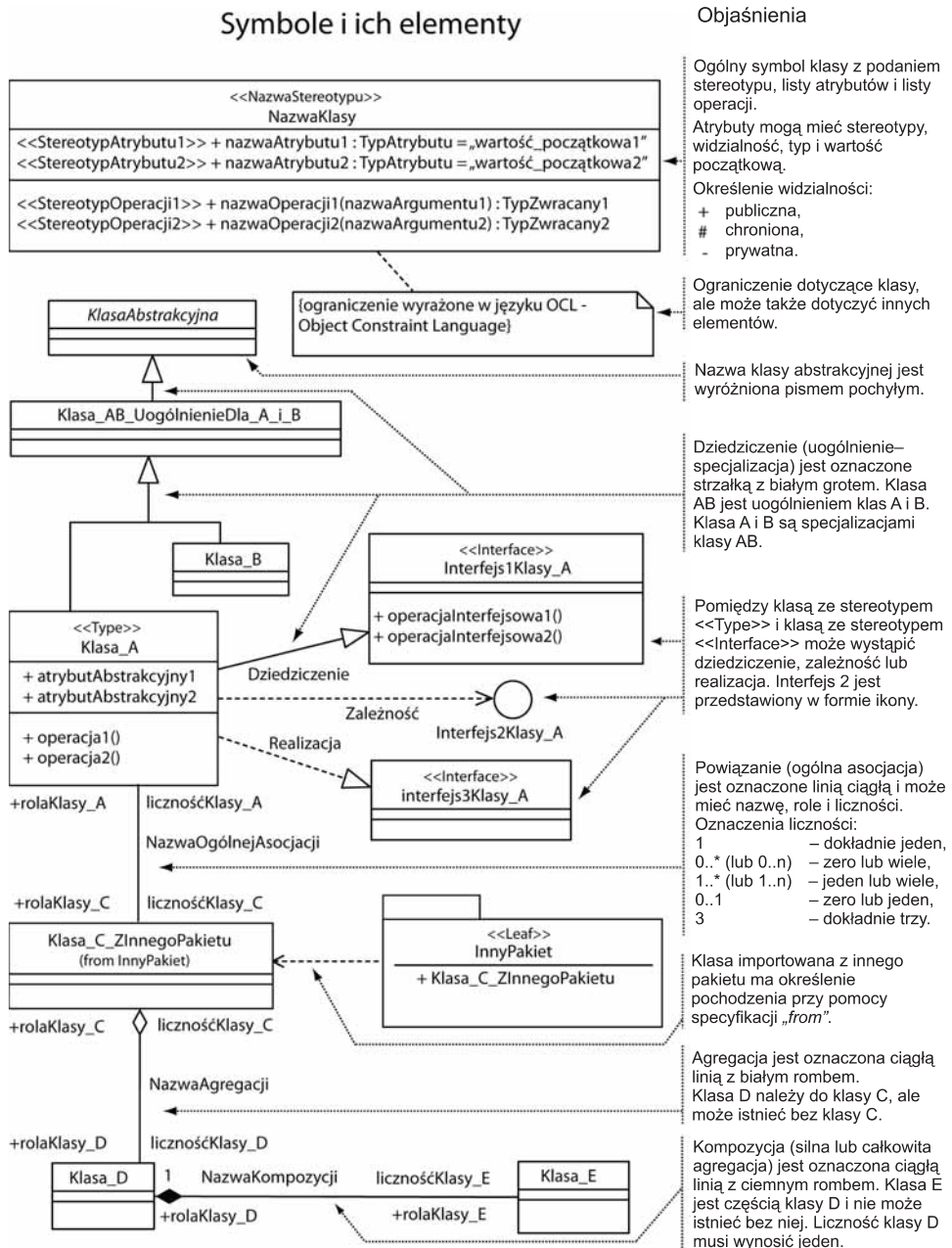


Fig. 2.4. Notacja graficzna diagramów klas języka UML w zakresie profilu normy PN-EN-ISO 19103 dla modeli pojęciowych danych geoprzestrzennych (Michalak, 2003b)

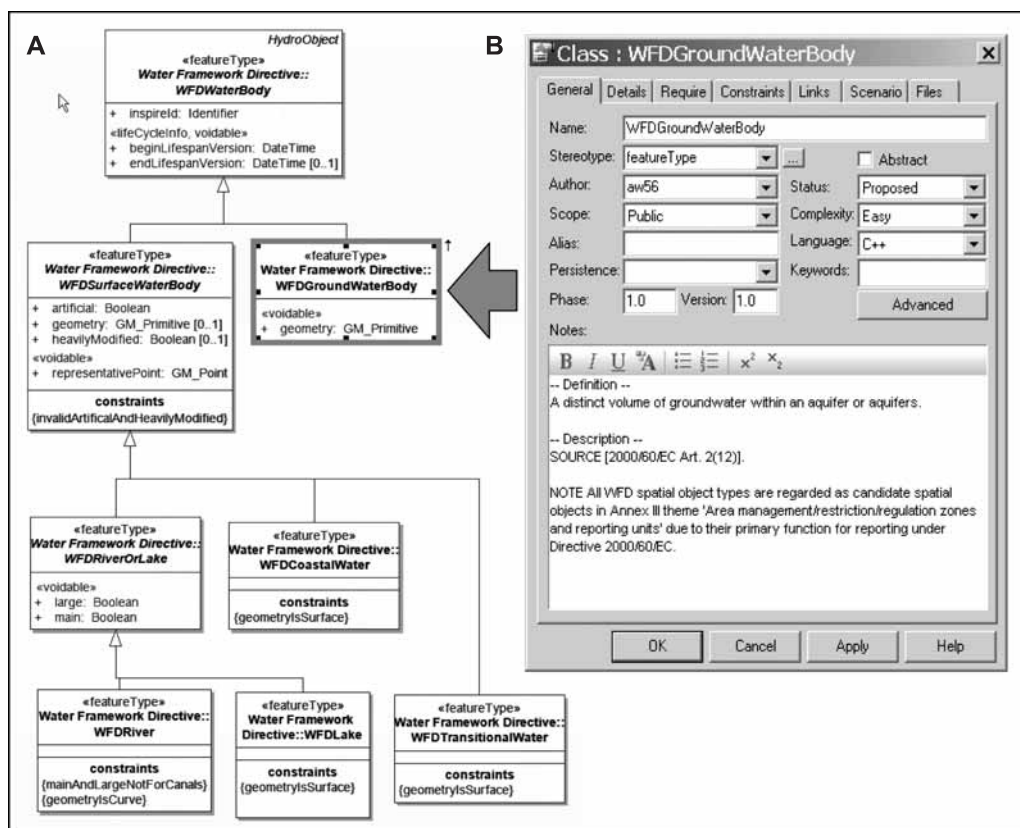


Fig. 2.5. Diagram klas języka UML modelu pojęciowego danych tematu „Hydrografia” dyrektywy INSPIRE

przypadku zachowuje się ich dokładną pisownię w języku angielskim. Nazwy wielowyrazowe pisane są „wielbłądem” (*CamelCase*), tzn. bez przerw (spacji), a poszczególne wyrazy zaczynają się wielką literą. Nazwy klas, typów i elementów rozpoczynają się wielką literą, a pozostałe małą, np.: „ToJestNazwaKlasy”, a „toJestNazwaAtrybutu”. Często dla lepszej czytelności akronimy występujące w nazwach są oddzielane podkreśleniem (*underscore* [_]), np. „CGI_Term” – termin z przestrzeni nazw CGI (*Commission for the Management and Application of Geoscience Information*).

Z dokumentów technicznych RDW dotyczących tych zagadnień, a także prac prowadzonych w tym zakresie przez inne kraje członkowskie wynika, że postać cyfrowa danych z uwzględnieniem ich przypisania przestrzennego (dane geoprzestrzenne) jest formą podstawową. Dokumenty te jednak dotyczą głównie tych danych, które są niezbędne na poziomie ogólnoeuropejskim – ich szczegółowość jest dostosowana do wymagań analiz przestrzennych opracowywanych dla obszaru całej Europy, co w przybliżeniu odpowiada skali 1:250 000. Przekazywanie informacji o stanie wód w takiej skali przestrzennej do europejskiego systemu WISE nie jest jedynym zadaniem

krajów członkowskich, wynikającym z RDW (Scheidleder, 2004). Głównym celem działań, jakie powinny prowadzić kraje członkowskie, aby realizować obowiązki wynikające z tej dyrektywy, jest ustawiczne dbanie o ilość i jakość wód będących w dyspozycji poszczególnych społeczeństw, systematyczne obserwowanie zmian, jakie w tym zakresie zachodzą, analizowanie ich przyczyn i podejmowanie środków zaradczych (Pollard, 2004a, b). Te działania wymagają przeprowadzenia różnych prac studialnych i analitycznych z wykorzystaniem danych przestrzennych znacznie bardziej szczegółowych i można przyjąć, że w większości przypadków w Polsce szczegółowość informacji przestrzennej dotyczącej wód podziemnych odpowiada skali 1:50 000, a w szczególnych przypadkach może to być skala 1:25 000 lub nawet 1:10 000. Również zakres tematyczny danych niezbędnych do zastosowań krajowych jest znacznie szerszy i bardziej szczegółowy, niż to określają wymagania odpowiednie dla zastosowań ogólnoeuropejskich.

Diagram na figurze 2.5 określa elementy i ich powiązania z zakresu danych RDW. Na przykładzie klasy *WFDGroundWaterBody* przedstawione w oddzielnym oknie dane zawarte w modelu pojęciowym są bardziej szczegółowe od tych widocznych na samym diagramie. Klasa ta ma określoną reprezentację geometryczną jako *GM_Primitive*, co oznacza, że może to być punkt, krzywa, powierzchnia lub bryła w przestrzeni trójwymiarowej (3D). Inne atrybuty tej klasy są dziedziczone od abstrakcyjnej (nieposiadającej swoich instancji) klasy *WFDWaterBody*. Należą do nich: identyfikator wyróżnienia INSPIRE, data wprowadzenia konkretnego wyróżnienia do rejestru, a także data usunięcia go z tego rejestru.

Dokumenty techniczne RDW (WFD WG GIS, 2003a, b; EC, 2009) określają także podstawowe standardy dotyczące danych przestrzennych – głównie specyfikacje OGC (*Open Geospatial Consortium*) (OGC, 2010) i normy grupy ISO 19100, opracowywane w Komitecie Technicznym ISO/TC 211 (ISO/TC 211, 2010). Nowy dokument dotyczący informacji geoprzestrzennej (elementów GIS) w RDW (EC, 2009) wskazuje na konieczność powiązania tej problematyki z rozwiązaniami przyjętymi w dokumentach technicznych dyrektywy INSPIRE, a w szczególności ze specyfikacjami danych z zakresu tematów dotyczących wód i z wodami powiązanych. Obok tematu „Geologia” (*Geology*), w ramach którego mieści się geoprzestrzenna informacja hydrogeologiczna, należy wymienić w szczególności (INSPIRE DTDS, 2008):

1. Temat „Hydrografia” (*Hydrography*) (INSPIRE TWG Hydrography, 2010), dotyczący głównie wód powierzchniowych, ale także zawierający wszystkie elementy danych (klasy obiektów) z zakresu RDW, w tym element *WFDGroundWaterBody* (fig. 2.5). Element ten jest prawie pusty, ponieważ jego atrybuty będą określone w specyfikacji danych tematu „Geologia” lub tematu „Gospodarowanie obszarem, strefy ograniczone i regulacyjne oraz jednostki sprawozdawcze”, które będą opracowane w terminie późniejszym.
2. Temat „Obszary chronione” (*Protected sites*), do których zalicza się rezerваты i pomniki przyrody nieożywionej, w tym także związane z wodami podziemnymi.
3. Temat „Urządzenia do monitorowania środowiska” (*Environmental monitoring facilities*), w ramach którego znajdują się dane dotyczące stacji monitoringu wód podziemnych.
4. Temat „Gospodarowanie obszarem, strefy ograniczone i regulacyjne oraz jednostki sprawozdawcze” (*Area management/restriction/regulation zones and reporting units*) obejmuje dane dotyczące stref ochrony wód podziemnych (ochrona pośrednia) i stref ochrony ich ujęć (ochrona bezpośrednia). Prawdopodobnie będą tu także dane dotyczące obszarów, na których znajdują się JCWPd (sprawa nie została rozstrzygnięta, ponieważ nie opracowano jeszcze specyfikacji danych tego tematu).

5. Temat „Zasoby energetyczne” (*Energy resources*), w ramach którego mieszczą się zagadnienia dotyczące geotermii i wód termalnych.
6. Temat „Zasoby mineralne” (*Mineral resources*) – wody mineralne w wielu opracowaniach dotyczących dyrektywy INSPIRE są zaliczane do tej kategorii, jednak i w tym przypadku sprawy nie rozstrzygnięto, ponieważ specyfikacja danych tego tematu nie została jeszcze opracowana.

Listę wszystkich 34 tematów wyszczególnionych w trzech załącznikach dyrektywy INSPIRE zawiera tabela 2.1. Wśród nich 16 tematów jest powiązanych bezpośrednio lub pośrednio z geologią i hydrogeologią. Powiązania te mają różny charakter – od specyfikacji układów odniesienia i kwadratowych siatek teselacyjnych stosowanych także dla danych hydrogeologicznych, poprzez słownik nazw geograficznych stosowanych w hydrogeologii, do bezpośrednich asocjacji dwukierunkowych z elementami tematu „Hydrografia”.

Szczegółowy zakres tematyczny i formy zapisu danych hydrogeologicznych w ramach INSPIRE nie są jeszcze znane, ponieważ specyfikacja danych tematu „Geologia” jest w trakcie opracowania. Jednak ogólny zarys jest określony w dokumencie Definicja tematów aneksu i ich zakres (INSPIRE DTDS, 2008). Z dokumentu tego wynika, że dane będą dotyczyły głównie lokalizacji zasobów wód spełniających wymagania stawiane wodzie pitnej, mają wspomagać ochronę tych zasobów, służyć procedurom określania wpływu zanieczyszczeń na te wody, a także pozwolić na projektowanie obiektów inżynierskich, na które wody podziemne mogą oddziaływać zarówno w czasie budowy, jak i eksploatacji.

W dokumencie dotyczącym zakresu danych INSPIRE (INSPIRE DTDS, 2008) jest określony minimalny zestaw danych dla poszczególnych wyróżnień hydrogeologicznych, który obejmuje:

- rodzaj warstwy wodonośnej – porowata, szczelinowa lub krasowa,
- parametry określające ilość wody w poziomie wodonośnym,
- parametry określające jakość wody,
- parametry określające dynamikę, w tym wielkość zasilania i drenażu oraz wielkość i kierunek przepływu,
- podatność na zanieczyszczenia,
- głębokość podłoża.

Jest to tylko wstępna, ogólna lista atrybutów i trwające prace nad specyfikacją tematu „Geologia” rozszerzą tę listę i uściślą wymienione powyżej, mało precyzyjne określenia.

Uwzględniając fakt, że dane geoprzestrzenne określające warunki hydrogeologiczne JCWPd mają służyć nie tylko procedurom sprawozdawczym RDW, ale także utrzymaniu tych zasobów wód podziemnych w dobrym stanie, zakres informacji zawartych w krajowych zbiorach danych dotyczących poszczególnych JCWPd powinien być znacznie szerszy niż ten, jaki będzie określony w specyfikacji danych INSPIRE i dokumentach RDW. Pociąga to za sobą konieczność opracowania znacznie rozszerzonych modeli danych. Rozszerzenie to powinno być jednak wykonane na bazie podstawowych modeli przyjętych w dokumentach technicznych obu tych dyrektyw. Przegląd elementów i ich zawartości, jakie są planowane do przyjęcia w specyfikacji danych INSPIRE i dokumentach RDW, zawierają figury 2.6, 2.7 i 2.8.

Tabela 2.1

**Zestawienie tematów wyszczególnionych w załącznikach 1–3
dyrektywy INSPIRE**

Aneks/ numer	Temat	Aneks/ numer	Temat
I/1	Systemy odniesienia za pomocą współrzędnych	III/5	Zdrowie i bezpieczeństwo ludzi
I/2	Systemy siatek geograficznych	III/6	Usługi użyteczności publicznej i służby państwowe
I/3	Nazwy geograficzne	III/7	Urządzenia do monitorowania środowiska
I/4	Jednostki administracyjne	III/8	Obiekty produkcyjne i przemysłowe
I/5	Adresy	III/9	Obiekty rolnicze i akwakultury
I/6	Działki katastralne	III/10	Rozmieszczenie ludności – demografia
I/7	Sieci transportowe	III/11	Gospodarowanie obszarem/ strefy ograniczone/regulacyjne i jednostki sprawozdawcze
I/8	Hydrografia	III/12	Strefy zagrożenia naturalnego
I/9	Obszary chronione	III/13	Warunki atmosferyczne
II/1	Ukształtowanie terenu	III/14	Warunki meteorologiczno-geograficzne
II/2	Użytkowanie terenu	III/15	Warunki oceanograficzno-geograficzne
II/3	Ortofotomapa	III/16	Regiony morskie
II/4	Geologia	III/17	Regiony biogeograficzne
III/1	Jednostki statystyczne	III/18	Siedliska i obszary przyrodniczo jednorodne
III/2	Budynki	III/19	Rozmieszczenie gatunków
III/3	Gleba	III/20	Zasoby energetyczne
III/4	Zagospodarowanie przestrzenne	III/21	Zasoby mineralne

Boldem wyróżniono tematy, które mają bezpośredni lub pośredni związek z zakresem tematycznym danych określających warunki hydrogeologiczne JCWPd w myśl zaleceń dokumentów wykonawczych RDW

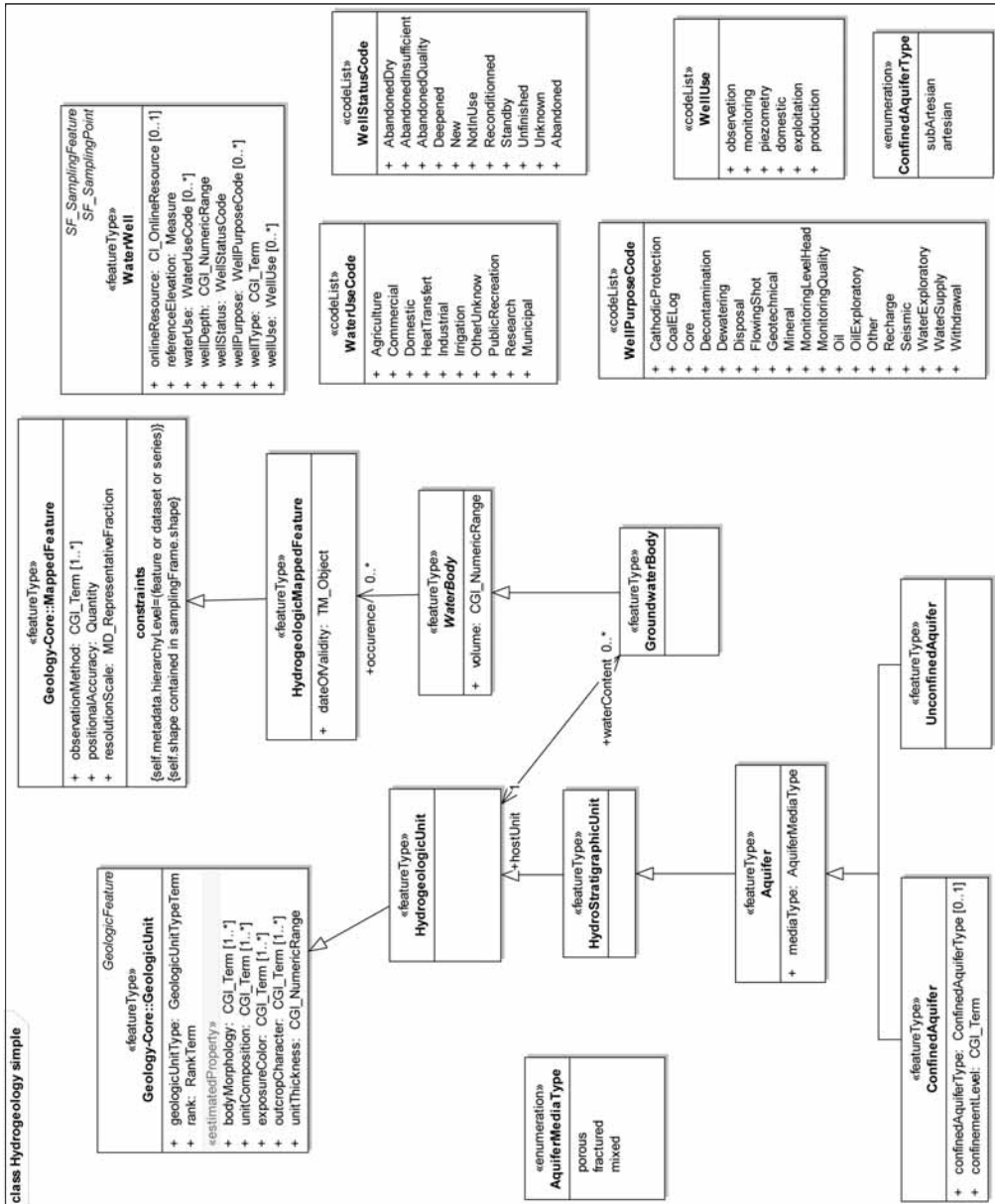


Fig. 2.6. Diagram klas języka UML roboczego modelu pojęciowego danych tematu „Geologia” dyrektywy INSPIRE

Diagram określa elementy i ich powiązania z zakresu danych hydrogeologicznych (INSPIRE TWG Geology, 2010). Model ten jest opracowywany na bazie modeli pojęciowych języków GeoSciML (fig. 2.7) i GWML (fig. 2.8)

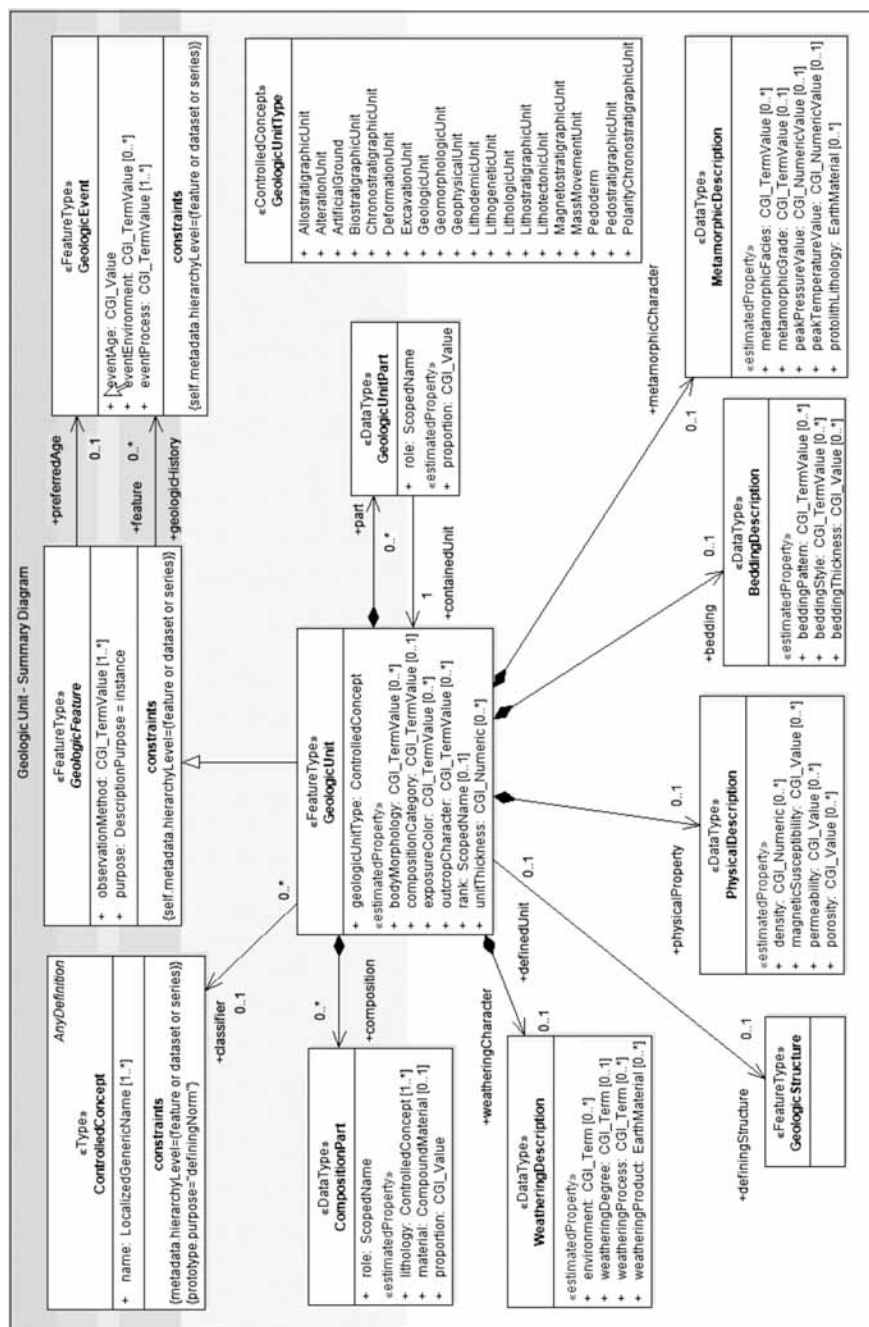


Fig. 2.7. Diagram klas języka UML modelu pojęciowego danych języka GeoSciML

Jest to znacznikowy język zapisu danych z zakresu nauk o Ziemi (IGW-CGI-IUGS, 2008). Diagram ten definiuje model pojęciowy otoczenia klasy *GeologicUnit*, z której w języku GWML (fig. 2.8) jest wyprowadzona klasa *HydrogeologicUnit*. W konsekwencji klasa jednostki hydrogeologicznej w modelu GWML dziedziczy wszystkie elementy geologicznej, zdefiniowane w tym modelu pojęciowym

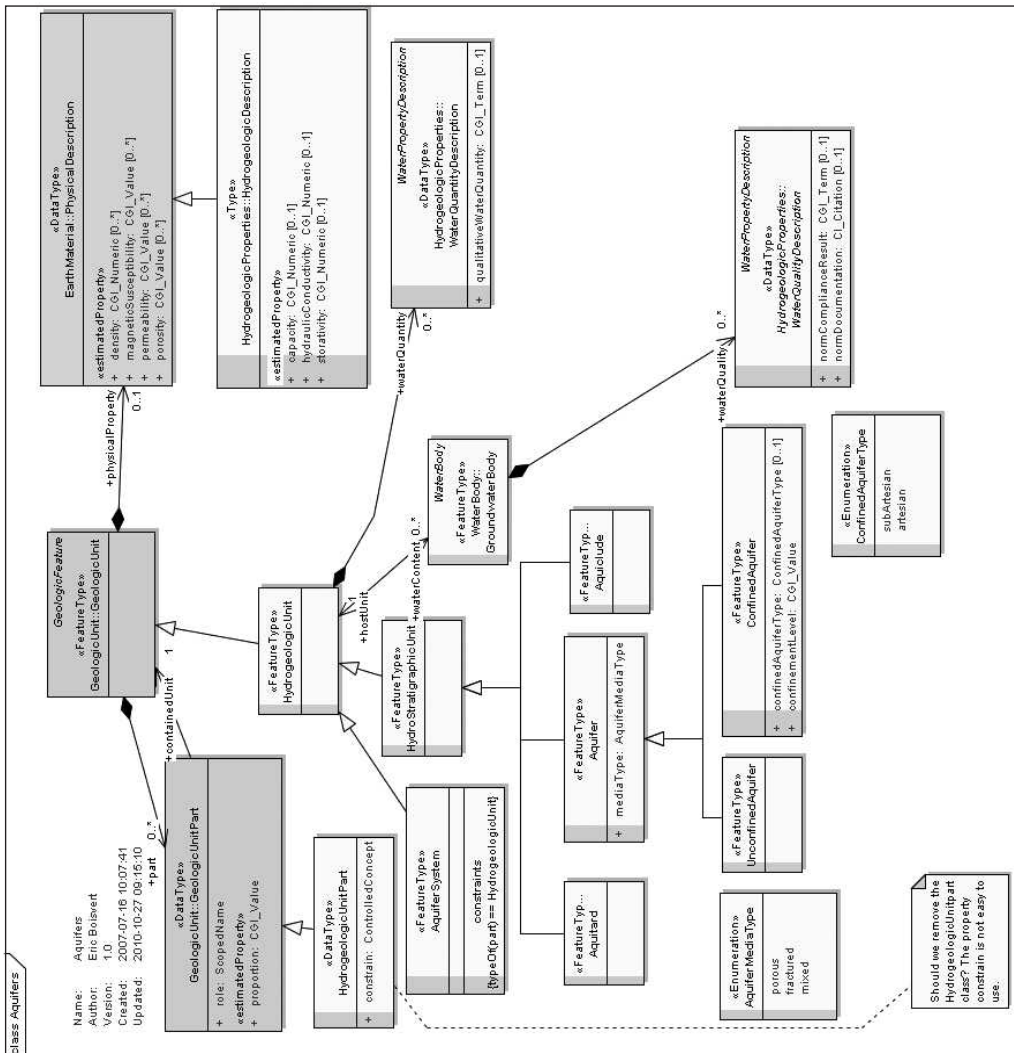


Fig. 2.8. Diagram klas UML modelu pojęciowego danych ięzyka GWML

Jest to znacznikowy język zapisu danych z zakresu hydrogeologii (Boisvert, Brodarric, 2010). W ze-
spole roboczym specyfikacji da-
nych tematu „Geologia” przyjęto,
że będzie on podstawą modelu po-
jęciowego dla danych hydrogeo-
logicznych w INSPIRE

spole roboczym specyfikacji danych tematu „Geologia” przyjęto,

że będzie on podstawą modelu porównawczego dla danych hydrogeologicznych w INSPIRE

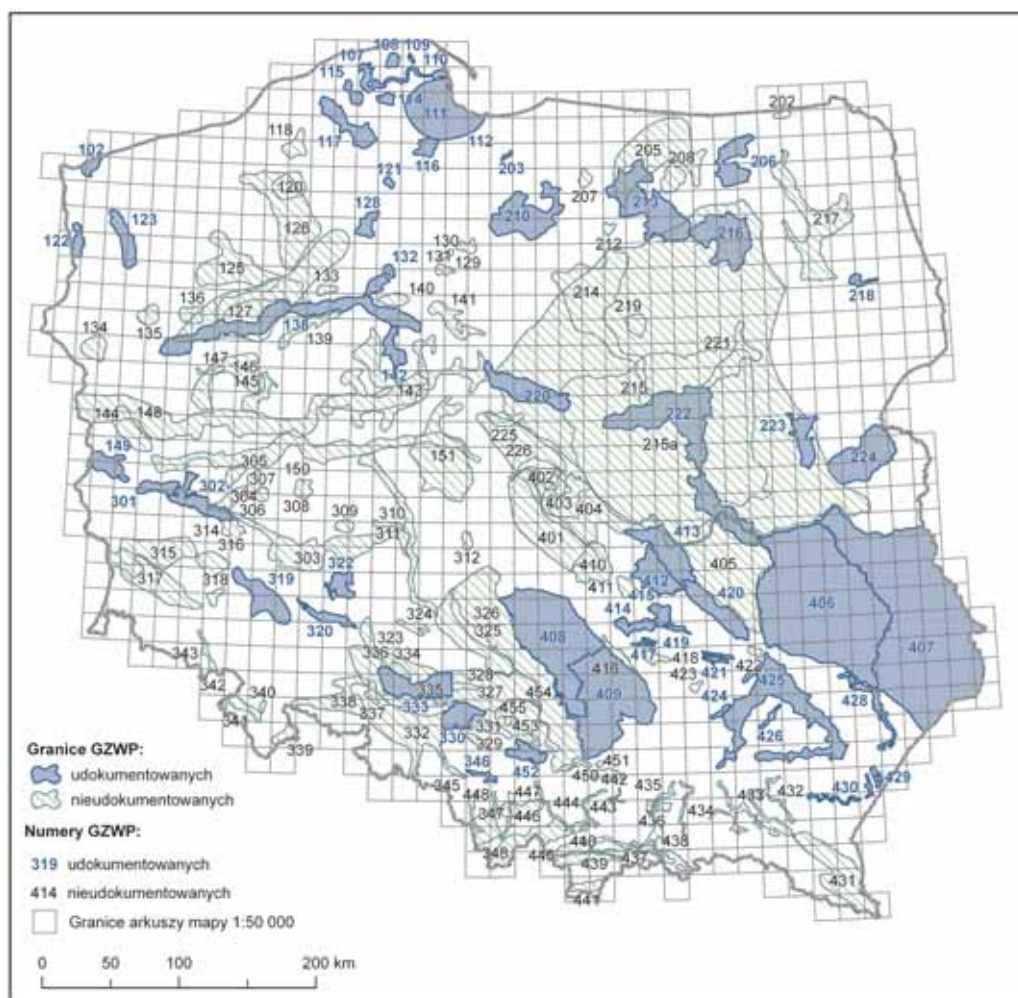


Fig. 2.9. Zasięgi głównych zbiorników wód podziemnych (stan: luty 2008 wg wykazu MŚ i KZGW) – mapa stopnia udokumentowania

W publikacjach dotyczących implementacji RDW, w różnych krajach członkowskich Unii Europejskiej można znaleźć różne podejście metodologiczne, dotyczące wyodrębniania jednostek obszarowych JCWPd. Często podejście to jest zbliżone do metodyki wyodrębniania głównych zbiorników wód podziemnych przyjętej w Polsce (fig. 2.9). Poszczególne jednostki należą do różnych kategorii głębokościowych: płytkie, średniogłębokie i głębokie. Jednostki o różnej kategorii głębokościowej mogą się na siebie nakładać przestrzennie całkowicie lub częściowo. Przy takim sposobie wyodrębniania są także obszary, na których brak jest jednostek obszarowych przypisanych do JCWPd – tzw. obszary puste. Metodologia przyjęta w Polsce jest w tym przypadku inna – nie ma takich obszarów kraju, które nie należałyby do jakiejś jednostki obszarowej JCWPd i jednostki nie zachodzą na siebie przestrzennie (fig. 2.10). Takie podejście jest podobne do po-



Fig. 2.10. Mapa 172 jednolitych części wód podziemnych (JCWPd) zweryfikowanych w 2008 r. (Nowicki, Olędzka, red., 2009)

działu kraju na jednostki administracyjne któregoś z poziomów: wojewódzkiego, powiatowego lub gminnego. Konsekwencją takiego wyodrębniania jednostek obszarowych JCWPd jest to, że jeżeli gdziekolwiek stan jakościowy lub ilościowy nie spełni kryteriów, zawsze musi to znaleźć swój wyraz w charakterystyce stanu JCWPd.

2.2. Specyfikacje schematów JCWPd

Jako specyfikację schematu warunków hydrogeologicznych JCWPd rozumie się dokument tekstowy w formie elektronicznej i zestaw zbiorów danych geoprzestrzennych zapisanych w ustalonej formie i strukturze, a także zbiór metadanych opisujących ten zestaw zbiorów danych. Wszystkie powyższe składniki specyfikacji nawzajem się uzupełniają i ich zawartość nie powinna się w nich powtarzać. Z tego względu opis tekstowy jedynie ogólnie przedstawia zawartość

zestawu zbiorów danych i zbioru metadanych. Ilustracje w opisie tekstowym powinny być obrazem graficznym danych zawartych w zbiorach, np. w postaci map uzyskanych z systemów geoinformatycznych (typu GIS) lub z przeglądarek danych geoprzestrzennych (wizualizacja danych). W przypadkach, gdy ilustracje nie odnoszą się bezpośrednio do danych, powinny być z nimi zharmonizowane, np. przekrój hydrogeologiczny powinien być zgodny z modelem budowy przestrzennej, zapisanym w zbiorach danych.

Zgodnie z powyższym, wyniki prac nad schematami warunków hydrogeologicznych JCWPd składają się z dwóch znacznie różniących się części:

1. Opisu tekstowego, przedstawiającego ogólną charakterystykę JCWPd, relacje z innymi sąsiednimi JCWPd, jej cechy charakterystyczne i wszystkie te informacje, które nie są zawarte w zbiorach cyfrowych danych geoprzestrzennych. Część tekstowa zawiera także opisy zbiorów danych zawartych w drugiej cyfrowej części specyfikacji oraz graficzne interpretacje tych danych w postaci map utworzonych przy pomocy określonego systemu geoinformatycznego (typu GIS).
2. Płyty CD zawierającej zestawu zbiorów danych geoprzestrzennych oraz uporządkowanych w hierarchiczną strukturę katalogów, zorganizowane według ustalonych w Informatorze zasad.

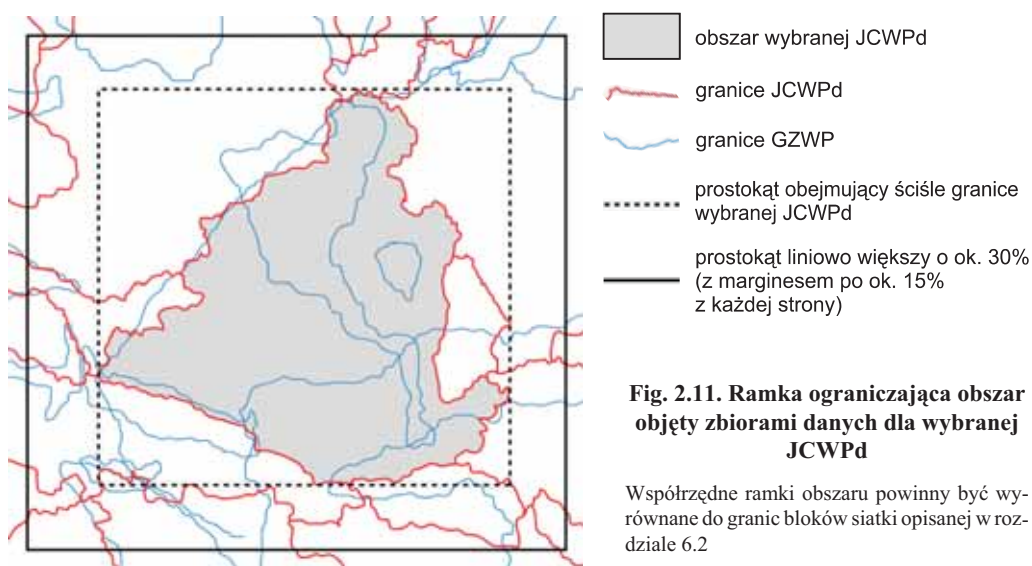
Ścisłe powiązanie części tekstowej i cyfrowej jest niezbędnym warunkiem poprawnego wykorzystania specyfikacji w dalszych pracach, prowadzących do pełniejszego poznania warunków hydrogeologicznych JCWPd (określenia jakości i ilości wód rozpatrywanej jednostki) z zastosowaniem metod komputerowych do analizy stanów JCWPd. Z tego względu w części tekstowej powinny się znaleźć wskazania, jakiego rodzaju analizy powinny być wykonane w dalszych etapach prac badawczych. Może to być tylko prosta analiza relacji przestrzennych pomiędzy różnymi elementami dotyczącymi JCWPd, wykonana przy pomocy systemu GIS. Może to być także bardziej zaawansowana metoda badawcza, np. ocena podatności wybranego poziomu wodonośnego na wpływ zanieczyszczeń, a w uzasadnionych przypadkach konieczne będzie opracowanie modelu przepływu wód podziemnych i wykonanie przy jego pomocy analizy pola hydrodynamicznego w stanie ustalonym lub nieustalonym.

Zbiór metadanych, zawierający oddzielne rekordy opisujące poszczególne zbiory danych, powinien spełniać wymagania specyfikacji INSPIRE w zakresie struktury metadanych, jednak zakres treści w poszczególnych polach obligatoryjnych nie musi tych wymagań spełniać całkowicie.

Zestaw zbiorów danych geoprzestrzennych dla określonej JCWPd obejmuje wcześniej zdefiniowany obszar w kształcie prostokąta, opisanego przy pomocy współrzędnych przyjętego układu odniesienia. Wymiary prostokąta określa się tak, aby były liniowo większe o około 30% od prostokąta obejmującego ściśle granice opisywanej JCWPd (fig. 2.11). Zaleca się, aby współrzędne tego prostokąta były określone zgodnie z przyjętą siatką pokryć macierzowych (rastrowych) dla wszystkich JCWPd.

Prostokąt na figurze 2.11 określa obszar zbierania i przetwarzania danych źródłowych. Dane wynikowe powinny być ograniczone do obszaru JCWPd (zaznaczonego na figurze kolorem szarym). Na granicach sąsiadujących ze sobą JCWPd występują takie same problemy interpretacyjne, jakie pojawiają się na sąsiadujących ze sobą arkuszach map seryjnych (np. MHP), opracowanych przez różnych autorów. Z tego względu konieczne jest uzgodnienie interpretacji danych źródłowych po obu stronach granicy sąsiadujących JCWPd.

Fakt, że jest to drugi etap prac nad schematami warunków hydrogeologicznych JCWPd, determinuje zakres tematyczny specyfikacji. W pierwszym etapie powstały opracowania tekstowe



zawierające ogólną charakterystykę obszarów poszczególnych JCWPd, w których obrębie występują jednostki hydrogeologiczne stanowiące środowisko tych JCWPd. Opracowania te zawierają także wstępną koncepcję schematów warunków hydrogeologicznych, jednak przedstawioną w formie uniemożliwiającej głębszą ocenę, weryfikację tych schematów oraz porównanie sąsiadujących ze sobą JCWPd i znajdujących się na tych obszarach głównych zbiorników wód podziemnych. Z tego względu specyfikacje opracowane w drugim etapie są ukierunkowane głównie na pełne udokumentowanie schematów w postaci geoprzestrzennych danych cyfrowych i na weryfikację, przy pomocy tych danych, schematów wstępnych.

Wąski zakres opisu tekstowego, będący konsekwencją powyższych założeń, ma na celu zapobiec powtarzaniu informacji zawartych w opracowaniach z pierwszego etapu. W niektórych przypadkach nowe dane lub nowe analizy zebranych danych znacząco zmieniają wiedzę o panujących w rozpatrywanej jednostce warunkach hydrogeologicznych. Istotnymi w tym przypadku elementami opisu tekstowego są:

- szczegółowy wykaz źródeł danych i informacji o specyfikowanej JCWPd;
- zakres zestawienia pozyskanych danych w formie umożliwiającej dalsze przetwarzanie;
- opisy danych przetworzonych z uwzględnieniem wniosków, jakie można z tych danych wprowadzić przy pomocy prostych analiz relacji przestrzennych.

Opisy tekstowe specyfikacji opracowywanych w drugim etapie, którego dotyczy niniejszy Informator, mają inny cel, niż opisy tekstowe opracowań z pierwszego etapu. Ich głównym zadaniem jest objaśnienie zawartości poszczególnych zbiorów danych i podanie tych istotnych informacji, które nie wynikają bezpośrednio z danych zawartych w tych zbiorach. Takimi szczególnymi przypadkami są przekroje geologiczne i hydrogeologiczne, dla których nie ma jeszcze odpowiednich standardowych form zapisu danych geoprzestrzennych w nich zawartych. Ze względu na zalecenia, aby nie powtarzać treści opisów tekstowych z pierwszego etapu prac w opisach tekstowych etapu drugiego, poniżej przedstawiono w skrócie zakres opisu tekstowego opracowań etapu pierwszego.

2.2.1. Opis tekstowy opracowań pierwszego etapu, przedstawiający ogólną charakterystykę JCWPd

Pierwszym, wstępnym etapem opracowywania modeli pojęciowych jest zebranie danych i przedstawienie opisu rozpatrywanej JCWPd. Opis JCWPd przedstawia budowę geologiczną, warunki hydrogeologiczne i środowiskowe JCWPd oraz stopień ich rozpoznania i jest wzbogacony o charakterystykę odporności warstw wodonośnych na przenikanie zanieczyszczeń z powierzchni terenu.

Zakres opisu oraz sposób jego wykonania są podobne do tych, jakie wykonuje się w przypadku struktur bądź jednostek hydrogeologicznych w opracowaniach regionalnych. Opis ten w sposób możliwie wierny przedstawia strukturę jednostki hydrogeologicznej, dynamikę wód, ich zasoby i chemizm. Charakteryzuje rzeczywistą komplikację budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych, zmienność przestrzenną w pionie i poziomie horyzontów wodonośnych, ilustrowaną w miarę możliwości przekrojami hydrogeologicznymi lub profilami wierceń oraz tabelami zawierającymi informacje o parametrach hydrogeologicznych. W opisie uwzględnia się istniejące opracowania regionalne, kartograficzne oraz źródłowe dane wiertnicze i dane z monitoringu wód podziemnych.

Opis składa się z następujących elementów:

- lokalizacji JCWPd pod względem: geograficznym, klimatycznym, zlewni, regionów wodnych i RZGW, sąsiednich JCWPd, arkuszy MHP, GZWP, regionów hydrogeologicznych zgodnych z Monografią hydrogeologiczną Polski (Paczyński, Sadurski, red., 2007), zawierającą podział na JCWPd;
- opisu budowy geologicznej z uwzględnieniem struktur geologicznych, elementów tektoniki i charakterystyki stratygraficzno-litologicznej;
- charakterystyki warunków hydrogeologicznych – opisu wykształcenia i zasięgów pięter oraz poziomów wodonośnych w skali regionalnej; wartości parametrów hydrogeologicznych; wskazania głównych kierunków filtracji, stref zasilania i drenażu regionalnego; bilansu i ilości zasobów (odnawialnych i dostępnych do zagospodarowania);
- charakterystyki chemizmu wód ze wskazaniem: typu chemicznego, klasy jakości środowiskowej, przekroczeń stężeń substancji względem norm zaopatrzenia w wodę ludności, strefowość hydrochemiczną, zagrożenia ascencją i ingresją wód słonych bądź zdegradowanych.

Część opisowa zawiera ilustracje, m.in. mapy oraz przekroje geologiczne i hydrogeologiczne, przedstawiające budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne (fig. 2.12).

2.2.2. Wymagania dotyczące jednolitej formy specyfikacji drugiego etapu

Z uwagi na znaczną liczbę specyfikacji wynikającą z liczby wyodrębnionych w Polsce JCWPd zaleca się, aby i części tekstowe, i cyfrowe miały formę jak najbardziej jednolitą. Z tego względu proponuje się przyjęcie jednego szablonu dla wszystkich opracowań tekstowych. Ponieważ jednak poszczególne JCWPd często znacznie się różnią pod względem typów jednostek hydrogeologicznych, w których występują oraz pod względem panujących tam warunków, szablon jest jedynie ogólną ramą i w uzasadnionych przypadkach można od niego odstąpić.



Części cyfrowe specyfikacji również powinny być wykonane w sposób możliwie jak najbardziej jednolity dla ułatwienia korzystania z nich i racjonalnego zorganizowania repozytorium, w którym w przyszłości zbiory danych opisujące JCWPd będą przechowywane i udostępniane do dalszych prac badawczych. Przykład struktury zestawu zbiorów danych, stanowiących cyfrową część specyfikacji schematu warunków hydrogeologicznych określonej JCWPd, jest przedstawiony na figurze 2.13 i opisany w rozdziale 6.1.2. W miarę powstawania nowszych wersji specyfikacji w tym zestawie może przybywać nowych zbiorów danych i z tego powodu potrzebne jest określenie numeru wersji zmieniającego się zestawu, a także opis zawartości poszczególnych wersji w formie rekordów metadanych.

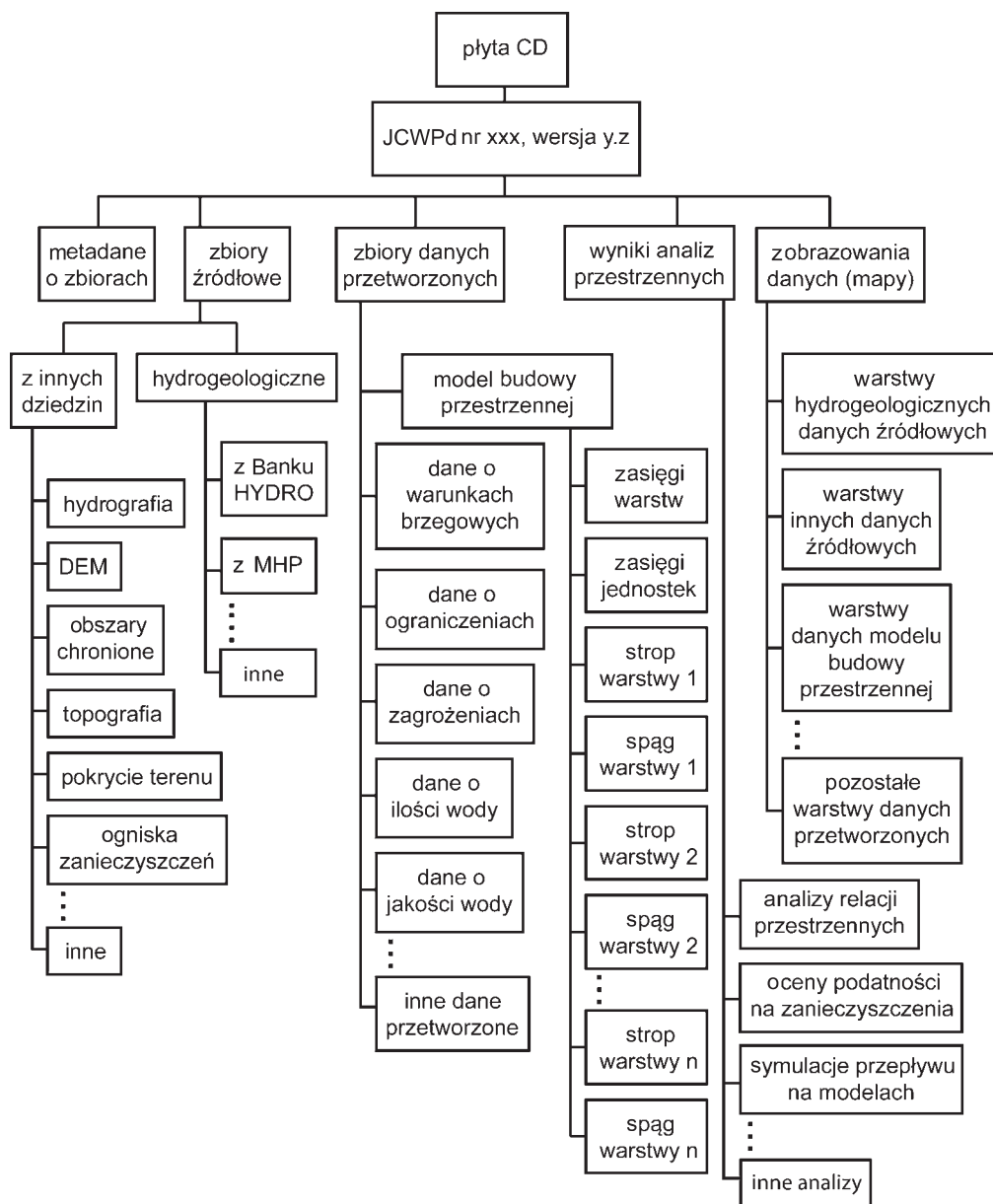


Fig. 2.13. Przykład struktury zestawu zbiorów danych stanowiących cyfrową część specyfikacji schematu warunków hydrogeologicznych określonej JCWPd

W miarę rozwoju specyfikacji może w tym zestawie przybywać nowych zbiorów danych i z tego powodu potrzebne jest określenie numeru wersji

Przedstawiona powyżej zasada jednolitości specyfikacji schematów dotyczy także form zapisu danych w poszczególnych zbiorach, zarówno danych typu wyróżnienia w formie wektorowej (*vector features*), jak i typu pokrycia w formie macierzowej (*matrix coverages*). Jednolitość tych form jest niezbędna w przypadkach, gdy trzeba połączyć odpowiednie zbiory dwóch lub kilku sąsiadujących ze sobą JCWPd w celu przeprowadzenia wspólnej analizy, a także w przypadkach zmiany granic JCWPd lub wprowadzenia nowego podziału. Dokumenty techniczne dyrektyw RDW i INSPIRE określają, że sposobem zapisu danych geoprzestrzennych ma być język GML w wersji 3.2.1, jednak obecnie nie są jeszcze opracowane odpowiednie schematy aplikacyjne tego języka dla danych hydrogeologicznych. Brak jest także odpowiedniego oprogramowania geoinformatycznego (w tym typu GIS) do przetwarzania danych w takim zapisie (Michalak, 2008). Z tego względu, jako tymczasowe przejściowe formy zapisu danych, proponuje się zastosować powszechnie obecnie używane i niezależne od konkretnego oprogramowania formaty zapisu dla obu kategorii danych:

- dla danych typu wyróżnienie w formie wektorowej – format ESRI Shapefile z określonymi na wstępie nagłówkami tabel atrybutów tematycznych (ESRI, 1998),
- dla danych typu pokrycie – format ESRI ArcInfo ASCII Grid (ESRI, 2009).

Oba te formaty pochodzą ze środowiska oprogramowania komercyjnego firmy ESRI, jednak dostępność ich specyfikacji i fakt, że są obsługiwane przez zdecydowaną większość powszechnie stosowanego oprogramowania zarówno komercyjnego, jak i otwartego, pozwala na traktowanie ich jako najodpowiedniejsze obecnie formaty przejściowe. Bardziej szczegółowe określenie struktur i formatu poszczególnych zbiorów danych tematycznych jest opisane w rozdziałach 6.1 i 6.2.

3. FIZYCZNO-MATEMATYCZNE PODSTAWY MODELI PRZEPŁYWU WÓD

3.1. Równania opisujące trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w skałach porowatych

Przepływ wody w ośrodku porowatym podlega dwóm prawom: zachowania masy oraz zachowania pędu. Prawa te są wyrażone przez dwie podstawowe wielkości fizyczne, używane w hydrogeologii (Verruijt, 1970):

- wysokość hydrauliczną

$$\Phi = \frac{p}{\rho g} + z \quad [\text{m}] \quad [3.1]$$

gdzie:

$p = p(x, y, z)$ – ciśnienie wody w punkcie o współrzędnych (x, y, z) [Pa]

$\rho = \rho(x, y, z)$ – gęstość wody wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami [kg/m^3]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

- objętościowy strumień przepływu wody

$$\underline{q} = (q_x, q_y, q_z) \quad [\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2]$$

zdefiniowanego jako objętość wody przepływającej w ciągu 1 sekundy przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku przepływu. Objętościowy strumień przepływu $\underline{q} = (q_x, q_y, q_z)$ (zwany też prędkością filtracji lub przepływem właściwym; *specific discharge*) jest bezpośrednio związany ze średnią prędkością przemieszczania się cząstek wody w porach ośrodka skalnego, czyli prędkością porową

$$\underline{v}_p = \frac{\underline{q}}{n_{\text{ef}}} \quad [\text{m/s}] \quad [3.2]$$

gdzie:

n_{ef} – współczynnik porowatości efektywnej ośrodka porowatego [–]. W dalszym ciągu indeks „ef” będzie pomijany, gdyż w Informatorze nie są dyskutowane inne rodzaje porowatości.

Uogólnieniem strumienia objętościowego jest strumień masowy

$$\underline{\tilde{q}} = \rho \cdot \underline{q} \quad [\text{kg/s} \cdot \text{m}^2]$$

zdefiniowany jako masa wody przepływającej w ciągu 1 sekundy przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku przepływu.

Poniżej przedstawione są prawa zachowania dla przepływów wód podziemnych w trójwymiarowym (3D) porowatym ośrodku skalnym. Na ich podstawie wprowadza się ogólne równanie przepływu wód podziemnych w trójwymiarowym ośrodku skalnym. Równanie przepływu wód podziemnych dla uproszczonego dwuwymiarowego modelu przepływu (2D), zwanego modelem przepływu płaskiego, są przedstawione w rozdziale 4.

3.1.1. Równanie ciągłości

Równanie ciągłości wyraża prawo zachowania masy wody wewnątrz ośrodka porowatego (Bear, 1972), tj.

$$\frac{\partial (\rho n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \underline{q}) = 0 \quad [3.3]$$

Równanie ciągłości jest zapisywane także równoważnie w dwóch innych postaciach:

$$\frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = -\text{div}(\rho \underline{q}) \quad [3.4]$$

lub

$$\frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial \rho q_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho q_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho q_z}{\partial z} \right) \quad [3.5]$$

Człon po lewej stronie równania ciągłości reprezentuje szybkość gromadzenia wody w jednostce objętości ośrodka porowatego i wyraża się w $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^3$. Prawa strona równania reprezentuje nadmiar objętości wody wpływającej nad wypływającą w jednostce czasu w odniesieniu do jednostki objętości ośrodka porowatego i także wyraża się w $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^3$.

Gromadzenie wody w nasyconym trójwymiarowym ośrodku porowatym zawsze jest związane ze wzrostem ciśnienia wody. Empirycznie stwierdzono (Bear, Verruijt, 1987), że szybkość zmian ciśnienia (a tym samym wysokości hydraulicznej) wywołana gromadzeniem wody jest proporcjonalna do szybkości gromadzenia wody w jednostce objętości ośrodka porowatego. Ujmuje to zależność:

$$\frac{\partial (\rho n)}{\partial t} \approx \frac{\partial p}{\partial t} \approx \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial (\rho n)}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad [3.6]$$

Stała proporcjonalności S_s nazywa się współczynnikiem wodopojemności sprężystej właściwej (*specific storativity*) i posiada wymiar $1/\text{m}$, tj. $[S_s] = [1/\text{m}]$.

Gdy gęstość wody ρ jest stała, równanie ciągłości dla przepływów trójwymiarowych najczęściej przyjmuje postać:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\text{div} \underline{q} \quad [3.7]$$

lub

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad [3.8]$$

W szczególności, dla stanów ustalonych (gdy wysokość hydrauliczna nie zmienia się w czasie) równanie ciągłości przyjmuje postać prostej zależności pomiędzy składowymi przepływu właściwego:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad [3.9]$$

Zależność ta oznacza, że dla stanów ustalonych tylko dwie spośród trzech składowych przepływu właściwego są niezależne. Zmienność przestrzenną trzeciej składowej przepływu właściwego można wyznaczyć z dwóch pozostałych, np.:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = - \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad [3.10]$$

3.1.2. Prawo zachowania pędu

Prawo zachowania pędu wody płynącej w porach ośrodka skalnego przyjmuje postać tzw. prawa Darcy. Zgodnie z tym prawem w każdym punkcie przestrzeni $\underline{x} = (x, y, z)$ zachodzi liniowa zależność pomiędzy wielkością strumienia objętościowego $\underline{q}$ a siłą wymuszającą ruch wody na jednostkę objętości $F = \nabla p - \rho g$. Zależność jest liniowa, gdyż współczynniki wiążące składniki siły wymuszającej ze składnikami prędkości objętościowej nie zależą od siły wymuszającej ani od strumienia objętościowego. Prawo Darcy sformułowane względem ciśnienia ma postać:

$$\underline{q} = - \frac{\kappa}{\mu} \cdot (\nabla p - \rho g) \quad [3.11]$$

gdzie:

κ – współczynnik przepuszczalności (zależny tylko od parametrów ośrodka gruntowego) [m^2]

μ – współczynnik lepkości dynamicznej wody [$\text{kg/m}\cdot\text{s}$]

p – ciśnienie [Pa]

ρ – gęstość wody wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami [kg/m^3]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

Jeśli gęstość cieczy jest stała ($\rho = \text{const.}$), to prawą stronę zależności [3.11] można wyrazić poprzez wysokość hydrauliczną $\Phi = \frac{p}{\rho \cdot g} + z$ [3.1]. Wówczas prawo Darcy przyjmuje szczególnie prostą i najczęściej stosowaną postać:

$$\underline{q} = -\kappa \frac{\rho g}{\mu} \nabla \Phi \quad [3.12]$$

lub

$$\underline{q} = -k \cdot \nabla \Phi, \quad [3.13]$$

gdzie:

$$k = \kappa \frac{\rho g}{\mu} - \text{współczynnik filtracji [m/s]}. \quad [3.14]$$

Postać skalarna prawa Darcy umożliwia wyznaczenie wszystkich trzech składowych wektora przepływu właściwego:

$$q_x = -k \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad [3.15]$$

$$q_y = -k \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad [3.16]$$

$$q_z = -k \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [3.17]$$

Prawo Darcy w powyższej postaci obowiązuje także w przypadku, gdy pory skały nie są zupełnie wypełnione wodą (przepływ nienasycony). Takie warunki występują najczęściej w strefie aeracji najwyżej położonej warstwy wodonośnej. Wówczas przyjmuje się, że współczynnik filtracji jest funkcją nasycenia wodą (nawodnienia) porów θ , tj. $k = k(\theta)$, a tym samym zależy od występującego w danym miejscu (pod)ciśnienia p , tj. $k = k(p)$. Prowadzi to do nieliniowego równania filtracji (tzw. równania Richardsa) i do znacznej komplikacji zagadnienia przepływu wód podziemnych. Zagadnienie przepływu w warstwie nienasyconej nie jest w niniejszym Informatorze rozważane. Rozpatrywanie tylko przepływów nasyconych wynika z obserwacji, że warunki hydrogeologiczne najczęściej występujące w Polsce powodują, iż średni czas pionowej filtracji wody opadowej przez strefę aeracji jest znacznie krótszy od czasu występowania tej wody w strefie saturacji.

Dla niektórych ośrodków porowatych (najczęściej dla skał szczelinowych) współczynnik filtracji przyjmuje postać macierzy (jest tensorem II rzędu). Takie przypadki są opisane w rozdziale 4.2.

Prawo Darcy jest słuszne tylko dla przepływów laminarnych w ośrodkach porowatych, dla których liczba Reynoldsa $R_e < 1$,

$$R_e = \frac{v_p d \rho}{\mu} \quad [3.18]$$

gdzie:

v_p – średnia prędkość wody w porach ośrodka skalnego [m/s]

d – uśredniona średnica porów [m]

ρ – gęstość wody [kg/m^3]

μ – współczynnik lepkości dynamicznej wody [kg/m/s].

Naturalne przepływy wód podziemnych w skałach porowatych prawie zawsze charakteryzują się wartościami liczby Reynoldsa mniejszymi od 1. Odstępstwa od prawa Darcy obserwuje się w przypadku przepływów turbulentnych, np. w skałach krasowych i niekiedy szczelinowych albo w przypadku przepływów bardzo powolnych, w których istotną rolę odgrywają oddziaływania molekularne, np. w łąkach koloidalnych (Nawalny, 1984).

3.1.3. Trójwymiarowe równanie przepływu wód podziemnych

Należy zauważyć, że trójwymiarowe równania przepływu wód podziemnych w skałach porowatych o zwierciadle swobodnym oraz o zwierciadle napiętym (naporowym) są identyczne. Mówi się zatem o jednym trójwymiarowym równaniu przepływu wód podziemnych. Inaczej przedstawia się sytuacja, gdy do opisu przepływu wód podziemnych stosuje się tzw. model przepływu płaskiego (2D). Zróżnicowanie równań przepływu płaskiego (2D) o zwierciadle swobodnym i naporowym jest omówione w rozdziale 4.1.3. Równanie opisujące trójwymiarowy przepływ nieustalony w nasyconym porowatym ośrodku skalnym może być wyprowadzone poprzez podstawienie prawa Darcy do prawa ciągłości:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\text{div} \underline{q} \quad \text{oraz} \quad \underline{q} = -k \nabla \Phi \quad \Rightarrow \quad S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{div} (k \nabla \Phi)$$

Równanie przepływu wody w trójwymiarowym nasyconym ośrodku porowatym najczęściej jest zapisywane w postaci:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(x, y, z) \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(x, y, z) \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(x, y, z) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] \quad [3.19]$$

Wyznaczenie rozwiązania $\Phi(x, t) = \Phi(x, y, z, t)$ powyższego równania jest punktem wyjścia wszelkich ilościowych i jakościowych analiz sytuacji hydrogeologicznych, w szczególności tych, w których jest rozważana ingerencja człowieka w środowisko wód podziemnych. Dokładna lub przybliżona postać rozwiązania $\Phi(x, t) = \Phi(x, y, z, t)$ równania [3.19] umożliwia bowiem wyznaczenie pola filtracji $\underline{q} = -k \nabla \Phi$ [3.13] z prawa Darcy, pola prędkości porowej $\underline{v}_p = \frac{\underline{q}}{n} = -\frac{k}{n} \nabla \Phi$

oraz, w dalszej kolejności, trójwymiarowych trajektorii cząstek wody. Zależność współczynnika filtracji od współrzędnych przestrzennych $x, y, z, k = k(x, y, z)$ w równaniu [3.19] umożliwia zróżnicowanie współczynnika filtracji w warstwach wodonośnych i przewarstwieniach wyróżnionych w schematach hydrogeologicznych. Ogólnie oznacza ona, że równanie przepływu w postaci [3.19] może być stosowane do skał niejednorodnych (rozdz. 4.2).

Celem niniejszego rozdziału jest znalezienie przybliżonego rozwiązania równania opisującego trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w złożonych systemach skał porowatych. W ogólnym przypadku nie jest bowiem możliwe podanie jego dokładnego analitycznego rozwiązania. Modele numeryczne (rozdz. 4.4.7) wyznaczające wartości rozwiązania w dyskretnych punktach przestrzeni i w dyskretnych chwilach czasu są przykładami rozwiązań przybliżonych. Aby można było poszukiwać rozwiązań przybliżonych, należy najpierw zagwarantować, że istnieje jednoznaczne rozwiązanie $\Phi(x, t)$ równania [3.19]. Warunkiem koniecznym i wystarczającym istnienia i jednoznaczności rozwiązania $\Phi(x, t)$ jest, by spełniało ono jednocześnie następujące warunki:

- warunek początkowy: $\Phi(x, 0) = \Phi_0(x)$, tj. opisujący zmienność przestrzenną wysokości hydraulicznej w całym obszarze przepływu Ω w chwili $t = 0$ za pomocą pewnej (znanej, założonej lub szacowanej) funkcji $\Phi_0(x)$;
- warunki brzegowe, tj. opisujące zmienność w czasie wysokości hydraulicznej lub jej pochodnej na wszystkich segmentach brzegu obszaru przepływu $\partial\Omega$. Odpowiednio ponumerowane rozłączne (nie zachodzące na siebie) segmenty brzegu muszą stanowić pokrycie całego brzegu, tj. $\partial\Omega = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \dots \cup \Gamma_n$. Na każdym z segmentów brzegu obszaru przepływu musi być zdefiniowany warunek brzegowy tylko jednego rodzaju. Dla równań typu parabolicznego, jakim jest równanie [3.19], warunki brzegowe mogą (i muszą) być dobrane w zależności od warunków fizycznych występujących na danym segmencie brzegu. Wyboru dokonuje się spośród trzech rodzajów warunków brzegowych:

I rodzaju (warunek Dirichleta):

$$\Phi(x, t)|_{x \in \Gamma_D} = \Phi_b(x, t)|_{x \in \Gamma_D} \quad [3.20]$$

Warunek ten oznacza, że na pewnym segmencie Γ_D dana (znana, założona lub szacowana) jest funkcja $\Phi_b(x, t)|_{x \in \Gamma_D}$ reprezentująca zmienność wysokości hydraulicznej na tym segmencie brzegu. Przykładem brzegu, na którym zwykle definiuje się warunek I rodzaju, jest segment brzegu warstwy wodonośnej stykający się z korytem rzecznym, w sytuacji gdy występuje dobry kontakt hydrauliczny pomiędzy wodami podziemnymi a wodą w korycie rzecznym (dobry kontakt

hydrauliczny występuje np. w miejscach erozji rzecznej). Wysokość hydrauliczną na brzegu obszaru filtracji $\Phi_b(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_D}$ reprezentuje wówczas wysokość zwierciadła wody w rzece $H_r(t)$ (nad przyjęty poziom odniesienia), tj. $\Phi_b(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_D} = H_r(t)$. Warunek brzegowy I rodzaju jest zwykle łatwy do określenia z uwagi na prostotę pomiaru wysokości zwierciadła wody w rzece – $H_r(t)$. Ma on także dobrą cechę redukcji wymiarowości zadania numerycznego, gdyż na danym segmencie brzegu obszaru filtracji wartości rozwiązania równania [3.11] są znane.

II rodzaju (warunek Neumanna):

$$-k \frac{\partial \Phi(\underline{x}, t)}{\partial n} \Big|_{\underline{x} \in \Gamma_N} = q_{nb}(\underline{x}, t) \Big|_{\underline{x} \in \Gamma_N} \quad [3.21]$$

Warunek II rodzaju oznacza, że na pewnym segmencie Γ_N dana (znana, założona lub szacowana) jest funkcja $q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N}$ reprezentująca zmienność składowej normalnej (prostopadłej) przepływu właściwego na tym segmencie brzegu, tj. $q(\underline{x}) \cdot \underline{n} = q_{nb}(\underline{x})$. Przykładem brzegu, na którym definiuje się warunek II rodzaju, jest segment brzegu obszaru filtracji, po którego zewnętrznej stronie znajduje się skała nieprzepuszczalna (i wtedy $q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N} = 0$) albo inny obszar, z którego do obszaru Ω wpływa (z obszaru Ω wypływa) przez segment Γ_N znany strumień objętościowy $q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N} \neq 0$. Przyjęcie warunku II rodzaju wymaga rozpoznania, że na danym segmencie brzegu obszar filtracji kontaktuje się ze skałami nieprzepuszczalnymi (np. wychodniami skał nieprzepuszczalnych) lub, gdy brzeg jest przepuszczalny – znajomości zasilania dalekiego zasięgu w postaci składowej normalnej przepływu właściwego na danym segmencie brzegu $q(\underline{x}) \cdot \underline{n}$. Zasilanie dalekiego zasięgu oznacza, że przyjęta na brzegu wartość składowej normalnej nie zmienia się pod wpływem przepływów w rozważanym obszarze filtracji. Wspomniana własność niezależności zasilania dalekiego zasięgu wymaga zawsze rzetelnego uzasadnienia. Gdy jest to trudne, stosuje się przesunięcie brzegu obszaru filtracji do miejsc, w których łatwiej jest wykazać niezależność zasilania dalekiego zasięgu.

III rodzaju (warunek Robina lub Cauchy'ego):

$$\alpha \Phi + \beta \frac{\partial \Phi(\underline{x}, t)}{\partial n} \Big|_{\underline{x} \in \Gamma_R} = \pi_b(\underline{x}, t) \Big|_{\underline{x} \in \Gamma_R} \quad [3.22]$$

Warunek ten oznacza, że na pewnym segmencie Γ_R dana (znana, założona lub szacowana) jest funkcja $\pi_b(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_R}$ reprezentująca kombinację liniową wysokości hydraulicznej oraz jej pochodnej na tym segmencie brzegu. Przykładem brzegu, na którym definiuje się warunek III rodzaju, jest segment brzegu warstwy wodonośnej stykający się z korytem rzeczonym o silnie zakolmatowanych osadach dennych (tj. ma miejsce sytuacja utrudnionego kontaktu hydraulicznego wód podziemnych z wodą w rzece). W takich warunkach hydrogeologicznych konieczna jest znajomość wartości wysokości zwierciadła wody w rzece $H_r(t)$ nad przyjęty poziom odniesienia oraz oporności c osadów dennych, gdzie $c = \frac{d_o}{k_o}$ [s], d_o – miąższość osadów dennych [m], k_o – współczynnik filtracji osadów dennych [m/s]. Wówczas parametry α i β oraz prawa strona warunku III rodzaju są określane następująco: $\alpha = \frac{1}{c}$, $\beta = k$, $\pi_b(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_R} = -\frac{H_r(t)}{c}$, gdzie k jest współczynnikiem filtracji w rozważanym obszarze filtracji wzdłuż brzegu Γ_R .

Postać równania [3.19] opisującego trójwymiarowy przepływ wód podziemnych odpowiada sytuacjom, w których ośrodek porowaty jest niejednorodny, tj. gdy współczynnik filtracji jest zmienny przestrzennie $k = k(x)$. To właśnie zmienność przestrzenna współczynnika filtracji stanowiła historycznie trudność modelowania złożonych systemów hydrogeologicznych i zmuszała do przyjmowania znacznych uproszczeń i schematyzacji sytuacji hydrogeologicznych. Fakt, że równanie przepływu 3D można w zasadzie rozwiązywać w sposób przybliżony (numerycznie) dla dowolnego rozkładu niejednorodności skał nie oznacza, iż schematyzacja traci na znaczeniu. Obecnie pełni ona dwie funkcje: a) konceptualizacji złożonego systemu hydrogeologicznego oraz b) zmniejszenie wymiarowości zadania numerycznego poprzez wyodrębnienie (pod)obszarów o (prawie) jednorodnym rozkładzie współczynnika filtracji i zaprojektowanie w tych (pod)obszarach rzadszej siatki dyskretyzacji. Szczególny przypadek stanowią zatem sytuacje, w których skała porowata jest jednorodna, tj. gdy współczynnik filtracji jest stały – $k = \text{const.}$ dla $(x, y, z) \in \Omega' \subset \Omega$. Wówczas równanie przepływu wód podziemnych [3.19] przyjmuje nieco prostszą postać:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = k \left\{ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right\} \quad [3.23]$$

Szczególnie prostą postać ma równanie filtracji, gdy ośrodek porowaty jest jednorodny, a przepływ jest ustalony:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad [3.24]$$

Równanie to, zwane równaniem Laplace’a, jest równaniem typu eliptycznego. Ze względu na brak zależności od czasu, dla istnienia i jednoznaczności jego rozwiązań nie jest potrzebny warunek początkowy. Niezbędne jest jednak określenie na każdym segmencie obszaru przepływu warunku brzegowego, który może być jednym z trzech typów – takich samych, jak dla równania [3.19].

3.2. Metody numeryczne

Równania różniczkowe opisują przepływ wód podziemnych lub transport masy w strumieniu wód podziemnych za pomocą zmiennych ciągłych, takich jak wysokość hydrauliczna lub stężenie substancji rozpuszczonej. W celu stworzenia modelu numerycznego równania te muszą być przetransformowane do postaci dyskretnej. Postać dyskretna równań oznacza, że ich przybliżone rozwiązania są wyznaczane jedynie w dyskretnych punktach przestrzeni (siatce dyskretyzacji) i w dyskretnych momentach czasu. Podstawowymi metodami rozwiązywania w sposób przybliżony równań przepływu wód podziemnych lub transportu masy w strumieniu wód podziemnych (wraz z odpowiednimi warunkami początkowymi i warunkami brzegowymi) są:

- metoda różnic skończonych,
- metoda skończonych objętości,
- metoda elementów skończonych.

Metody te są poniżej krótko scharakteryzowane. Bardziej szczegółowy opis tych (oraz innych) metod numerycznych można znaleźć w literaturze (Wang, Anderson, 1982; Anderson, Woessner, 1992; Holzbecher, Sorek, 2005).

Metoda różnic skończonych polega na aproksymacji pochodnych występujących w równaniach przepływu wód i transportu masy za pomocą ilorazów różnicowych wartości poszukiwanej funkcji w węzłach ortogonalnej siatki dyskretyzacji. Dla pierwszej i drugiej pochodnej pewnej funkcji f względem x najprostsza aproksymacja dyskretna ma postać:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad [3.25]$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2} \quad [3.26]$$

gdzie:

f_i, f_{i-1}, f_{i+1} – wartości funkcji w dyskretnych punktach siatki.

Zastąpienie pochodnych przez ilorazy różnicowe [3.25]–[3.26] prowadzi do systemu równań algebraicznych dla N niewiadomych ($f_1, \dots, f_N$), gdzie N oznacza liczbę węzłów dyskretyzacji. W zagadnieniach transportu masy często używa się nieco innej aproksymacji pochodnej, zwanej aproksymacją w przód (*upwind scheme*)

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} \quad [3.27]$$

Dla równań dwuwymiarowych (2D) przyjmuje się ortogonalną siatkę dyskretyzacji (fig. 3.1).

Zwykle wartości poszukiwanej funkcji są określone w węzłach siatki, a parametry występujące w odpowiednich równaniach określa się w przestrzeniach między węzłami. Rozwiązanie przybliżone otrzymuje się, rozwiązując N równań algebraicznych z N niewiadomymi dla dyskretnych chwil czasu. Odpowiedni schemat dyskretny w odniesieniu do zmiennej t umożliwia przejście od rozwiązań uzyskanych dla pewnej chwili czasowej do rozwiązań dla następnej chwili czasowej. W rezultacie „kroczenia w czasie” uzyskuje się przebieg czasowo-przestrzenny rozwiązania przybliżonego. Jeśli rozwiązania przybliżone spełniają określone kryteria dokładności, wówczas uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę analiz hydrogeologicznych i wyboru właściwego schematu hydrogeologicznego, obliczania dynamiki zasobów wód podziemnych oraz projektowania ujęć wód podziemnych, a także metod ochrony warstw wodonośnych lub ich remediacji w przypadku wystąpienia zanieczyszczenia.

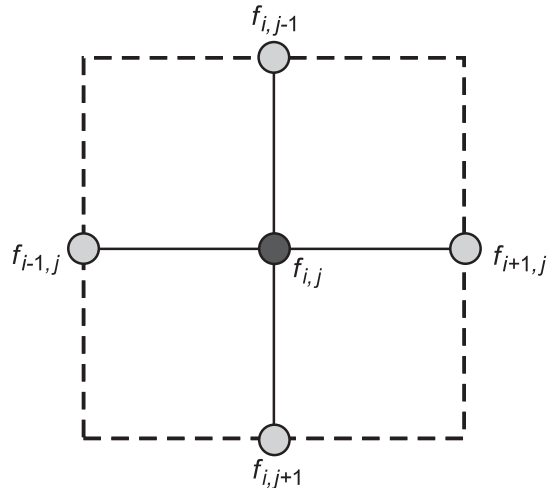


Fig. 3.1. Ortogonalna siatka dyskretyzacji

Metoda skończonych objętości jest wyprowadzona z zasady zachowania masy dla prostopadłościennych bloków, na które dzieli się cały obszar przepływu. Prawo zachowania masy

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{i-} + Q_{i+} + Q_{j-} + Q_{j+} + Q \quad [3.28]$$

gdzie:

V – objętość wody lub masa substancji w bloku

$Q_{i-}, Q_{i+}, Q_{j-}, Q_{j+}$ – przepływy przez ściany bloku

Q – źródła lub upusty dla objętości lub masy

ilustruje figura 3.2 ($f_{i,j}$ oznacza aproksymację funkcji f w węźle centralnym bloku (i, j)).

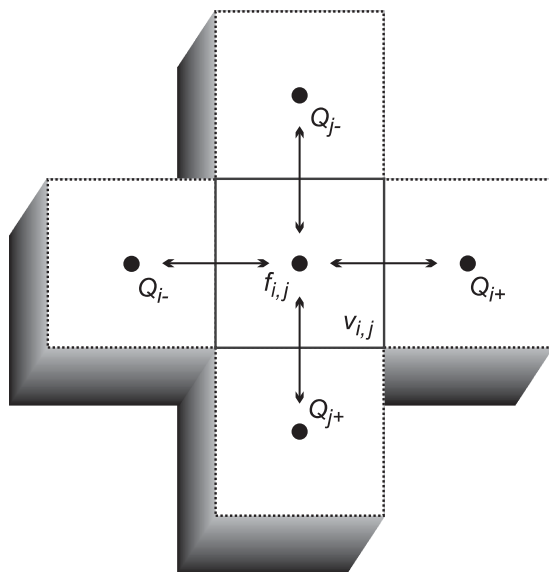
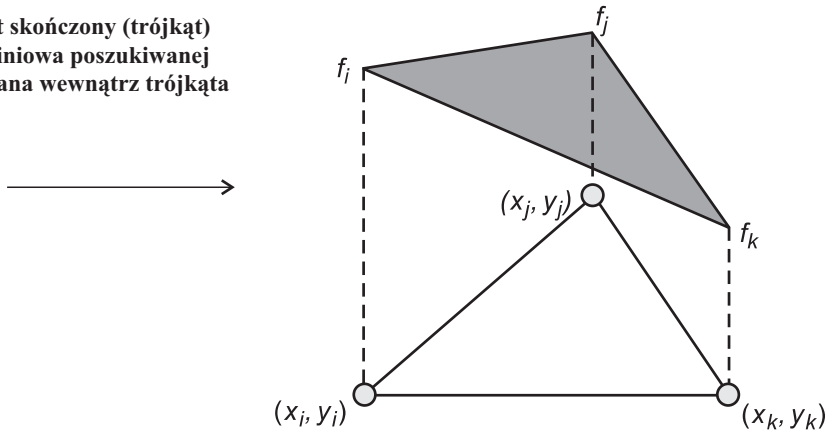


Fig. 3.2. Prostopadłościenne bloki dla dyskretyzacji 2D

Układ równań dla poszukiwanych funkcji (wysokości hydraulicznej lub stężenia substancji rozpuszczonej w wodzie) uzyskuje się, podając związki pomiędzy przepływami przez ściany bloków a tymi funkcjami. Metoda skończonych objętości dopuszcza inne niż prostopadłościenne kształty bloków, dzięki czemu jest bardziej elastyczna w odniesieniu do rekonstrukcji geometrii obszaru przepływu.

Metoda elementów skończonych wykazuje szereg dobrych własności, zarówno co do możliwości aproksymacji geometrii obszaru przepływu (lub transportu masy), jak i aproksymacji nieznanej funkcji. Najczęściej używanym kształtem elementów są: trójkąty – dla zagadnień 2D oraz ostrosłupy o podstawie trójkąta – dla zagadnień 3D (Nawalany, 1986, 1989). Poszukiwana funkcja jest aproksymowana wewnątrz elementów skończonych za pomocą wielomianu (fig. 3.3).

Fig. 3.3. Element skończony (trójkąt) i aproksymacja liniowa poszukiwanej funkcji, zdefiniowana wewnątrz trójkąta



Najprostszą postacią funkcji aproksymującej poszukiwaną funkcję wewnątrz danego elementu e (trójkąta) jest równanie płaszczyzny

$$f^e(x, y) = a_0^e + a_1^e x + a_2^e y \quad [3.29]$$

W metodzie elementów skończonych niewiadomymi są wartości parametrów tej funkcji, tj. a_0^e , a_1^e , a_2^e dla wszystkich elementów stanowiących pokrycie całego obszaru przepływu wód podziemnych lub transportu masy. Odpowiednie równania algebraiczne, których rozwiązaniami są poszukiwane parametry funkcji [3.29], uzyskuje się z tzw. słabej postaci równań opisujących dany proces przepływu lub transportu.

4. TYPY MODELI PRZEPŁYWU STOSOWANYCH DO SCHEMATÓW WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

4.1. Równania modelu przepływu płaskiego wód podziemnych w skałach porowatych

Oprócz równania [3.19] opisującego trójwymiarowy przepływ wód podziemnych, powszechnie jest stosowany prostszy, starszy opis procesu filtracji wody w skałach porowatych, zwany modelem przepływu płaskiego lub modelem Dupuita-Forchheimera (2D lub D-F). Model ten jest wciąż powszechnie stosowany w sytuacjach, gdy schematyzacja hydrogeologiczna prowadzi do wydzielenia warstw wodonośnych przedzielonych ciągłymi lub nieciągłymi warstwami o niewielkiej przepuszczalności. Model przepływu płaskiego zakłada, że składowa pionowa przepływu właściwego q_z w warstwach wodonośnych jest równa 0. Założenie takie jest uzasadnione, gdy składowa q_z jest znacznie mniejsza od składowych poziomych q_x oraz q_y . W najczęściej występujących sytuacjach hydrogeologicznych składowe poziome przepływy są o dwa lub nawet trzy rzędy wielkości większe od składowej pionowej. Model D-F implikuje niezależność wysokości hydraulicznej od zmiennej z , tj. że funkcja $\Phi(x, t)$ zależy jedynie od x , y oraz t . Przyjęcie założenia Dupuita-Forchheimera umożliwia wprowadzenie nowej zmiennej stanu $\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}(x, y, t)$, jawnie zależnej tylko od x , y i określonej w obszarze płaskim $\tilde{\Omega}$, który jest rzutem trójwymiarowego obszaru filtracji (np. warstwy wodonośnej) na płaszczyznę poziomą. Nowa zmienna $\tilde{\Phi}$, zastępująca oryginalną zmienną $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$, występuje w równaniu filtracji o niższej wymiarowości, co ułatwia w wielu przypadkach analizę sytuacji hydrogeologicznych. Zmienna ta ma prostą interpretację hydrauliczną – jest ona w dowolnej chwili czasu t średnią wysokością hydrauliczną pomiędzy spagiem i stropem warstwy wodonośnej dla ustalonej lokalizacji x , y , tj.

$$\tilde{\Phi}(x, y, t) = \frac{1}{m} \int_{z_1}^{z_2} \Phi(x, y, z, t) dz \quad [4.1]$$

gdzie:

$m(x, y) = z_2(x, y) - z_1(x, y)$ – miąższość rozważanej warstwy wodonośnej [m]
 $z_1(x, y)$, $z_2(x, y)$ – wysokości spagu i stropu warstwy dla lokalizacji x , y [m].

Równanie modelu płaskiego (2D) opisującego przepływ naporowy w warstwach wodonośnych przyjmuje wówczas postać:

$$S \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[T(x, y) \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T(x, y) \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} \right] + R(x, y, t) \quad [4.2]$$

gdzie:

$S = S_s \cdot m$ – współczynnik wodopojemności (*storativity*) [–]
 $T = k \cdot m$ – współczynnik przewodności hydraulicznej (*transmissibility*) [m²/s]

$R(x, y, z)$ – tzw. człon źródłowo-upustowy, reprezentujący zasilanie warstwy wodonośnej przez strop lub/i spąg: dodatni – dla zasilania (źródło), ujemny – dla strat wody (upust) [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$].

Człon źródłowo-upustowy w równaniu przepływu płaskiego stanowi superpozycję strumieni wody dostarczających/odprowadzających wodę do/z warstwy wodonośnej przez strop i spąg:

$$R(x, y, t) = -q_z(x, y, z_2, t) + q_z(x, y, z_1, t) \quad [4.3]$$

gdzie:

$q_z(x, y, z_2, t) = -\text{Inf}(x, y, t) + \sum_{k=1}^{N_w} Q_k \cdot \delta(x - x_k, y - y_k)$ – sumaryczne zasilanie/pobór wody przez strop z uwzględnieniem poboru wody w studniach [m^3/s]

x_k, y_k – współrzędne x, y k -tej studni [m]

[4.4]

$\text{Inf}(x, y, t)$ – zasilanie infiltracyjne strefy saturacji [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$]

$Q_k, (k = 1, \dots, N_w)$ – wydatek k -tej studni [m^3/s]

N_w – liczba studni pobierających wodę w obszarze przepływu (np. w danej warstwie wodonośnej)

Uwaga: funkcja $\delta(x - x_k, y - y_k)$ jest tzw. dystrybucją spełniającą warunek

$$\int_{\tilde{\Omega}} \delta(x - x_k, y - y_k) dx dy = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \tilde{\Omega} \text{ zawiera } k\text{-tą studnię} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad [4.5]$$

Komplikacje związane z właściwościami analitycznymi dystrybucji znikają, gdy studnie są traktowane jako brzeg ośrodka porowatego. Tego typu podejście jest jednak możliwe tylko wówczas, gdy zagadnienie przepływu płaskiego jest rozważane w otoczeniu jednej lub co najwyżej kilkunastu studzien oraz w skali przestrzennej co najwyżej dwa rzędy większej niż średnice studzien. Zawsze bowiem usytuowanie i geometria studzien (traktowanych jako brzeg) prowadzi do komplikacji w opisie obszaru przepływu. Podejście takie nie jest więc praktyczne dla rozważań o charakterze regionalnym. Zwykle równanie przepływu płaskiego rozwiązywane jest w sposób przybliżony, np. metodą elementów skończonych (MES) i problemy związane z występowaniem dystrybucji $\delta(\cdot, \cdot)$ w równaniu przepływu płaskiego znikają. Wyznaczanie równań algebraicznych w MES wymaga bowiem całkowania po pewnych podobszarach (elementach), co powoduje, że człon równania zawierający dystrybucję zamienia się w pojedyncze wyrażenie reprezentujące wielkość wydatku Q w studni, tj.

$$\int_{\tilde{\Omega}} Q_k \delta(x - x_k, y - y_k) dx dy = \begin{cases} Q_k & \text{gdy } \tilde{\Omega} \text{ zawiera } k\text{-tą studnię} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad [4.6]$$

Funkcję $\delta(x - x_k, y - y_k), (k = 1, \dots, N_w)$ we wzorze [4.4] można przybliżyć funkcją równą 0 na zewnątrz k -tej studni oraz równą $1/A_k$ w jej wnętrzu, gdzie A_k – pole przekroju poprzecznego k -tej studni [$1/\text{m}^2$]. Przyjęcie takiego przybliżenia oznacza, iż wewnątrz studni iloczyn $Q_k \delta(x - x_k, y - y_k)$ reprezentuje strumień objętościowy Q_k/A_k w k -tej studni oraz że, podobnie jak infiltracja, jest liczony w [$\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$].

$q_z(x, y, z_1, t) = s(x, y, t)$ – sumaryczne zasilanie danej warstwy wodonośnej (podsiąkanie/przesiákanie) przez spąg z sąsiedniej niżejległej warstwy wodonośnej; dodatnie – gdy warstwa jest zasilana przez spąg, ujemne – gdy następuje przesiąkanie do warstwy niżejległej.

Równanie przepływu płaskiego [4.2] jest równaniem parabolicznym. Dla istnienia i jednoznaczności jego rozwiązania $\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}(x, y, t)$ konieczne jest sformułowanie warunku początkowego i warunków brzegowych w podobny sposób, jak dla równania przepływu 3D (rozdz. 3.1.3). Warunek brzegowy I i III rodzaju są definiowane identycznie, jak w przypadku przepływów 3D, natomiast warunek II rodzaju wymaga określenia na odpowiednim segmencie brzegu składowej normalnej przepływu w przeliczeniu na jednostkę długości linii brzegowej. Fizycznie oznacza to, że na segmencie brzegu Γ_N należy zdefiniować $Q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N}$ [m³/s·m] zamiast $q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N}$. Jeśli $q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N}$ jest znane na brzegu Γ_N , to:

$$Q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N} = m \cdot q_{nb}(\underline{x}, t)|_{\underline{x} \in \Gamma_N} \quad [4.7]$$

gdzie:

m – miąższość warstwy wodonośnej na danym segmencie brzegu.

Szczególnego omówienia wymagają następujące aspekty modelu przepływu płaskiego:

- analog prawa Darcy dla modelu przepływu płaskiego,
- zagadnienie przepływu płaskiego w warunkach przepływu o zwierciadle swobodnym,
- różnice wartości współczynnika wodopojemności dla przepływów naporowych oraz przepływów o zwierciadle swobodnym,
- dokładność bilansów wód podziemnych wyznaczanych na podstawie modelu przepływu płaskiego.

4.1.1. Analog prawa Darcy dla modelu przepływu płaskiego

Przyjmując założenie Dupuita-Forchheimera łatwo dowieść, że dla uśrednionych po miąższości warstwy wodonośnej składowych poziomych przepływu właściwego:

$$\tilde{q}_x(x, y, t) = \frac{1}{m} \int_{z_1}^{z_2} q_x(x, y, z, t) dz \quad \text{oraz} \quad \tilde{q}_y(x, y, t) = \frac{1}{m} \int_{z_1}^{z_2} q_y(x, y, z, t) dz \quad [4.8]$$

spełnione jest (uśrednione) prawo Darcy, tj.:

$$\tilde{q}_x = -k \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} \quad \text{oraz} \quad \tilde{q}_y = -k \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} \quad [4.9]$$

Ponieważ prawe strony tego równania są niezależne od z , uśrednione składowe poziome przepływu właściwego są stałe dla całego odcinka pionu od spągu do stropu. Zatem, przepływy w warstwie wodonośnej przez powierzchnię $A_x = 1 \cdot m$ [m²] (o szerokości 1 m i wysokości równej miąższości warstwy) prostopadłą do x oraz, odpowiednio, przez powierzchnię $A_y = 1 \cdot m$ prostopadłą do y , wynoszą:

$$\tilde{Q}_x = m \tilde{q}_x = -mk \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} = -T \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} \quad [4.10]$$

$$\tilde{Q}_y = m \tilde{q}_y = -mk \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} = -T \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} \quad [4.11]$$

Wzory te reprezentują prawo Darcy dla modelu przepływu płaskiego.

4.1.2. Zagadnienie przepływu płaskiego w warunkach przepływu o zwierciadle swobodnym

Przyjmując założenie Dupuita-Forchheimera dla przepływów o zwierciadle swobodnym łatwo zauważyć, że $\Phi(x, y, t) \approx h(x, y, t)$, gdzie $h(x, y, t)$ jest położeniem swobodnego zwierciadła w punkcie o współrzędnych (x, y) w chwili t . Wówczas przewodność hydrauliczna $T = k \cdot h(x, y, t)$, a (płaskie) równanie przepływu przyjmuje postać:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot h(x, y, t) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot h(x, y, t) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + R(x, y, t) \quad [4.12]$$

lub postać równoważną:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + R(x, y, t) \quad [4.13]$$

Równanie przepływu dla modelu przepływu płaskiego jest zatem równaniem nieliniowym. Dla istnienia i jednoznaczności jego rozwiązania $h = h(x, y, t)$, konieczne jest zdefiniowanie na brzegu (płaskiego) obszaru przepływu warunku początkowego i warunków brzegowych. Warunki brzegowe dla równania [4.12] są takie same, jak dla modelu przepływu płaskiego. Są one omówione w rozdziale 3.1.3 (dla modelu 3D) oraz w rozdziale 4.1 (komentarz dla modelu 2D). W ogólnym przypadku, poszukiwanie przybliżonego rozwiązania równania [4.12] wymaga zastosowania metod numerycznych przystosowanych do rozwiązywania zagadnień nieliniowych, jednak w dwóch sytuacjach możliwe jest zlinearyzowanie równania [4.12], a następnie zastosowanie metod numerycznych przytoczonych w rozdziale 3.2. Równanie [4.12] daje się łatwo zlinearyzować w dwóch przypadkach:

1. Gdy rozważany jest stan ustalony przepływu płaskiego o zwierciadle swobodnym. Wówczas równanie [4.12] przyjmuje postać:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + R(x, y, t) \quad [4.14]$$

Równanie to jest równaniem eliptycznym i liniowym ze względu na funkcję $h^2(x, y, t)$.

2. Gdy rozważany jest nieustalony przepływ płaski związany ze zmianami położenia zwierciadła swobodnego, których amplituda Δh jest niewielka w porównaniu ze średnią miąższością zawodnionej części warstwy wodonośnej, tj. gdy $\Delta h(x, y, t) \ll \bar{h}(x, y)$, wówczas $T = k \cdot h(x, y, t) \approx k \cdot \bar{h}(x, y)$, co oznacza, że przewodność hydrauliczna warstwy wodonośnej może być traktowana jako parametr niezależny od czasu. Niezależność T od czasu powoduje z kolei, że dla przepływu płaskiego o zwierciadle swobodnym i dostatecznie dużej miąższości przepływu można stosować ogólne równanie modelu płaskiego, tj.:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[T(x, y) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T(x, y) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + R(x, y, t) \quad [4.15]$$

Zatem, jeśli tylko miąższość tego przepływu jest znaczna, metody numeryczne właściwe dla równania przepływu płaskiego naporowego mogą być stosowane do rozwiązywania zagadnienia przepływu o zwierciadle swobodnym. Należy pamiętać wówczas, by definiując prze-

wodność hydrauliczną $T(x, y) \approx k \cdot \bar{h}(x, y)$ zagwarantować (lub kontrolować), aby warunek $\Delta h(x, y, t) \ll \bar{h}(x, y)$ był spełniony w całym okresie symulacji.

4.1.3. Różnice wartości współczynnika wodopojemności dla przepływów naporowych oraz przepływów o zwierciadle swobodnym

Należy zwrócić uwagę, że współczynnik wodopojemności S występujący w równaniu [4.2] – dla przepływu naporowego oraz w równaniu [4.12] – dla przepływu o zwierciadle swobodnym, przyjmują wartości różniące się przynajmniej o rząd wielkości, mianowicie:

- dla przepływu naporowego: $S \approx 0,005$,
- dla przepływu o zwierciadle swobodnym: $S \cong n_{ef} \approx 0,01 - 0,25$.

Różnica między tymi wartościami powoduje, że w warstwie wodonośnej naporowej reakcja wysokości hydraulicznej na zmianę wymuszeń zewnętrznych (np. na gwałtowną zmianę poboru wody z tej warstwy) jest znacznie szybsza, niż reakcja wysokości hydraulicznej w warstwie wodonośnej o zwierciadle swobodnym. Jeśli w procesie identyfikacji parametrów modelu przepływu płaskiego współczynnik wodopojemności S jest parametrem dopasowywanym tak, by modelowane wartości wysokości hydraulicznej $\bar{\Phi}(x, y, t)$ lub $h(x, y, t)$ niewiele różniły się od wartości występujących w danych pomiarowych, wówczas obszary poszukiwań optymalnej wartości S powinny zawierać wartości typowe dla przepływu naporowego albo dla przepływu o zwierciadle swobodnym.

4.1.4. Dokładność bilansów wód podziemnych wyznaczanych na podstawie modelu przepływu płaskiego

W latach 60. ubiegłego wieku udowodniono (Halek, Svec, 1979), że choć model przepływu płaskiego nie prowadzi w pewnych warunkach hydrogeologicznych do poprawnego wyznaczenia położenia zwierciadła swobodnego (np. wewnątrz porowatej zapory na zbiorniku wodnym), mimo to umożliwia dokładne obliczenie przepływu przez zapórę. Ogólnie zachodzi zgodność pomiędzy przepływem w warstwie wodonośnej obliczonym za pomocą modelu trójwymiarowego a przepływem obliczonym za pomocą modelu płaskiego, tj.

- w modelu 3D przepływu w warstwie wodonośnej przez powierzchnie o jednostkowej szerokości i wysokości równej miąższości warstwy wodonośnej A_x oraz A_y , prostopadłe do kierunku przepływu, wynoszą odpowiednio:

$$Q_x = \int_0^m q_x(x, y, z, t) dz \quad \text{oraz} \quad Q_y = \int_0^m q_y(x, y, z, t) dz \quad [4.16]$$

- w modelu 2D przepływu w warstwie wodonośnej przez powierzchnie o jednostkowej szerokości i wysokości równej miąższości warstwy wodonośnej A_x oraz A_y , prostopadłe do kierunku przepływu, wynoszą odpowiednio:

$$\tilde{Q}_x = -m\tilde{q}_x = -T \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} \quad \text{oraz} \quad \tilde{Q}_y = -m\tilde{q}_y = -T \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} \quad [4.17]$$

Wspomniana zgodność oznacza, że $Q_x = \tilde{Q}_x$ oraz $Q_y = \tilde{Q}_y$.

Ten ważny rezultat teoretyczny uzasadnia powszechną stosowalność modelu przepływu płaskiego.

W hydrogeologii często rozwiązywane jest ważne zagadnienie praktyczne, polegające na wyznaczeniu bilansu wodnego zamkniętego obszaru (płaskiego). W bilansach wodnych korzysta się niejawnie z założenia D–F, obliczając składowe przepływy wód podziemnych przez brzeg obszaru bilansowego za pomocą wzoru:

$$\tilde{Q}_x = -k m \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x} \text{ oraz } \tilde{Q}_y = -k m \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y} \quad [4.18]$$

gdzie:

$\tilde{\Phi}$ – wysokość hydrauliczna pomierzona w terenie (mapa hydroizohips) [m]

$\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial x}, \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial y}$ – spadek wysokości hydraulicznej w kierunkach x oraz y na brzegu obszaru bilansowania [–]

m – miąższość warstwy wodonośnej na brzegu obszaru bilansowania [m].

Okazuje się, że błędy oszacowania Q_x oraz Q_y za pomocą wzorów [4.18], zdefiniowane jako błędy względne oszacowania wartości dokładnych $Q_{x \text{ exact}}$ oraz $Q_{y \text{ exact}}$ (tj. wyznaczonych z modelu trójwymiarowego) (Zijl, Nawalany, 1993):

$$\varepsilon(Q_x) = \frac{\tilde{Q}_x - Q_{x \text{ exact}}}{Q_{x \text{ exact}}} \text{ oraz } \varepsilon(Q_y) = \frac{\tilde{Q}_y - Q_{y \text{ exact}}}{Q_{y \text{ exact}}} \quad [4.19]$$

są w pierwszym przybliżeniu równe:

$$\varepsilon(Q_x) \cong \frac{1}{3} \left(\frac{\pi m}{L_x} \right)^2 \text{ oraz } \varepsilon(Q_y) \cong \frac{1}{3} \left(\frac{\pi m}{L_y} \right)^2 \quad [4.20]$$

gdzie:

L_x, L_y – skale przestrzenne reprezentujące przestrzenną zmienność w kierunku x oraz y mapy

hydroizohips $\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}(x, y)$ wyznaczonej na podstawie pomiarów terenowych [m].

Przyjmując, że błąd względny wyznaczania tych składowych przepływów nie powinien przekroczyć 3%, otrzymuje się następujące kryteria geometryczne wyznaczania bilansu wodnego dla warstw wodonośnych:

$$\frac{m}{L_x} \approx \frac{1}{10} \Rightarrow \varepsilon(Q_x) \approx 3\% \quad [4.21]$$

$$\frac{m}{L_y} \approx \frac{1}{10} \Rightarrow \varepsilon(Q_y) \approx 3\% \quad [4.22]$$

Z kryteriów tych wynika, że dla mapy hydroizohips charakteryzującej się na brzegu obszaru bilansowego „szybką” zmiennością $\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}(x, y)$ (tj. gdy jeden ze stosunków $\frac{m}{L_x}$ lub $\frac{m}{L_y}$ jest większy niż $\frac{1}{10}$), błąd oszacowanych przepływów $\tilde{Q}_x$ lub $\tilde{Q}_y$ w odniesieniu do przepływów rzeczywi-

stych (dokładnych) $Q_{x \text{ exact}}$ oraz $Q_{y \text{ exact}}$ może być większy niż 3%. W rezultacie bilans wodny całego obszaru może być obciążony znacznym błędem. Remedium w takich sytuacjach jest zmiana brzegu obszaru bilansowego (tak, by brzeg nie przecinał mapy hydroizohips w miejscach ich silnej zmienności) lub zastosowanie modelu 3D.

4.2. Równania opisujące trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w ośrodkach anizotropowych lub/i niejednorodnych

Przepływy wód podziemnych przez pewne rodzaje skał wskazują, że przyczyną ruchu wody w określonym kierunku nie jest wyłącznie spadek (pochodna) wysokości hydraulicznej Φ w tym kierunku, ale także spadki (pochodne) wysokości hydraulicznej w pozostałych kierunkach, prostopadłych do kierunku przepływu. Przykładami takich skał są skały szczelinowe, które tworzą zespoły szczelin ułożonych w dwóch lub trzech uprzywilejowanych kierunkach, niekoniecznie prostopadłych. W takich przypadkach jest stosowane prawo Darcy, w którym współczynnik filtracji nie jest wielkością skalarną, lecz macierzą (tensorem II rzędu):

$$\underline{q} = -\underline{K} \nabla \Phi \quad [4.23]$$

gdzie:

$$\underline{K} = \begin{Bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{Bmatrix} \quad [4.24]$$

Spośród dziewięciu elementów macierzy $\underline{K}$ tylko sześć elementów jest niezależnych, gdyż macierz jest symetryczna, tj. $k_{xy} = k_{yx}$, $k_{xz} = k_{zx}$ oraz $k_{yz} = k_{zy}$. Składowe przepływy właściwego są opisane w tym przypadku następującymi wzorami:

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - k_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - k_{xz} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [4.25]$$

$$q_y = -k_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - k_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - k_{yz} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [4.26]$$

$$q_z = -k_{xz} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - k_{yz} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - k_{zz} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [4.27]$$

Oznacza to, że skała szczelinowa o takich właściwościach wymaga znajomości lub wyznaczenia sześciu wartości współczynnika filtracji (k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} , k_{xy} , k_{xz} oraz k_{yz}) zamiast jednego współczynnika k charakterystycznego dla klasycznego prawa Darcy.

O skałach, dla których konieczny jest opis prawa Darcy w postaci [4.23] mówi się, że są anizotropowe. Skały, w których przepływ wód podziemnych wymaga sześciu wartości współczynnika filtracji, występują jednak niezwykle rzadko. Niekiedy przepływ w każdym z kierunków zależy jedynie od spadku (pochodnej) wysokości hydraulicznej dokładnie w każdym z rozważanych kierunków, ale związek pomiędzy przyczyną (spadkiem wysokości hydraulicznej w danym kierunku) a skutkiem (przepływem w danym kierunku) jest inny dla każdego z trzech kierunków. Wówczas macierz współczynnika filtracji przyjmuje tzw. postać ortotropową:

$$\underline{\underline{K}} = \begin{Bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{Bmatrix} \quad [4.28]$$

Odpowiednio, składowe przepływu właściwego są wyznaczane z prostej postaci prawa Darcy:

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad [4.29]$$

$$q_y = -k_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad [4.30]$$

$$q_z = -k_{zz} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [4.31]$$

W skałach osadowych (np. w wapiennych skałach jurajskich) występuje wyraźna anizotropia, która objawia się dominacją przepływów poziomych w stosunku do przepływów pionowych (przy identycznych spadkach hydraulicznych w kierunku poziomym i pionowym). Do opisu właściwości hydraulicznych takich skał stosuje się wówczas jeszcze prostszą (ortotropową) postać współczynnika filtracji:

$$\underline{\underline{K}} = \begin{Bmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & k_v \end{Bmatrix} \quad [4.32]$$

gdzie:

k_h i k_v – poziomy i pionowy współczynnik filtracji [m/s],

a składowe przepływu właściwego są wyznaczane ze szczególnie prostej postaci prawa Darcy:

$$q_x = -k_h \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad [4.33]$$

$$q_y = -k_h \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad [4.34]$$

$$q_z = -k_v \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [4.35]$$

Choć formalnie opis przepływu w takich skałach wymaga znajomości dwóch wartości współczynnika filtracji, to jednak często przyjmuje się, że pomiędzy nimi występuje zależność liniowa: $k_h = \alpha \cdot k_v$, gdzie α jest rzędu 10.

Dla skał anizotropowych, opisywanych za pomocą jednej z dwóch ortotropowych macierzy filtracji, równanie przepływu wód podziemnych przyjmuje następujące postaci:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad [4.36]$$

lub

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad [4.37]$$

Równania te opisują dynamikę zmian wysokości hydraulicznej w skałach anizotropowych (ortotropowych) i niejednorodnych.

Gdy skała jest anizotropowa (ortotropowa), ale jednorodna, wówczas równanie przepływu wód podziemnych przyjmuje prostszą postać:

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad [4.38]$$

lub

$$S_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} = k_h \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) + k_v \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad [4.39]$$

Do rozwiązywania równań przepływu w skałach anizotropowych o słabej anizotropii (ortotropii) stosuje się te same metody numeryczne, jak dla pełnych równań 3D.

4.3. Równania opisujące przepływ wód podziemnych w skałach szczelinowych

Opis przepływu wód podziemnych w skałach szczelinowych wiąże się z dwoma podstawowymi utrudnieniami:

- niepewnością co do topologii sieci spękań/szczelin występujących w rozważanym środowisku skalnym,
- jednoczesnym występowaniem przepływu w szczelinach oraz w otaczającej skale porowatej.

Stosunkowo prosta jest sytuacja, gdy szczelin jest niewiele, ich geometria oraz sposób powiązania w sieć jest znana, a skała otaczająca jest nieprzepuszczalna. Wówczas znajdują zastosowanie równania hydrauliki podobne do przepływu w sieci rur lub przepływu w układach przecinających się płaszczyzn. W miarę wzrostu komplikacji sieci spękań możliwość identyfikacji geometrii i parametrów hydraulicznych pojedynczych szczelin znacznie się zmniejsza, co powoduje konieczność stosowania innych sposobów opisu przepływu wód podziemnych. Podstawową metodą umożliwiającą wyznaczenie pola przepływu właściwego w przypadku złożonych systemów szczelin jest opis zakładający, że przepływ ten jest analogiczny do przepływu w pewnym „równoważnym” ośrodku porowatym. Innymi słowy, przepływ w szczelinach może być w pewnych sytuacjach opisywany za pomocą prawa Darcy. Gdy dodatkowo matryca skalna jest porowata, pojawia się zagadnienie sprzęgania przepływów charakteryzujących się wyraźnie różną dynamiką. Występowanie składowej przepływu w ośrodku porowatym powoduje, że przepływ wypadkowy (w szczelinach i porowatej matrycy) staje się przepływem niestacjonarnym. Poniżej są przytoczone wzory umożliwiające obliczanie pola przepływu w skałach szczelinowych w pięciu sytuacjach hydrogeologicznych. Wzory te są wyprowadzone i omówione przez M. Nawalanego w pracy Thiela i in. (Thiel, red., 1989).

Poniżej jest przedstawiony sposób obliczania przepływu właściwego oraz współczynnika przewodności hydraulicznej lub zastępczego współczynnika filtracji dla skał szczelinowych w pięciu kategoriach przepływu:

- model pojedynczego spękania,
- model wielu spękań (sieci ortogonalnych spękań),

- model mieszany (sieci spękań w ośrodku porowatym),
- losowa sieć spękań,
- model przepływu nieustalonego.

Omawiane wzory obowiązują w przypadku przepływów laminarnych, tj. gdy liczba Reynoldsa jest mniejsza od 1000. Odpowiednie wzory i literatura, dotyczące przepływów turbulentnych w skałach szczelinowych, są omówione w pracy Thiela i in. (Thiel, red., 1989).

4.3.1. Model pojedynczego spękania

Pojedyncze spękanie o szerokości b jest usytuowane pomiędzy dwoma pionowymi płaszczyznami równoległymi do osi x oraz z (fig. 4.1).

Dla przepływu ustalonego uśrednienie po szerokości szczeliny równania Naviera-Stokes'a prowadzi bezpośrednio do wzorów umożliwiających obliczenie składowych przepływu właściwego:

$$q_x = -\frac{b^2}{12} \cdot \frac{g}{\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} + z \right) \quad [4.40]$$

$$q_z = -\frac{b^2}{12} \cdot \frac{g}{\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p}{\gamma} + z \right) \quad [4.41]$$

gdzie:

b – szerokość szczeliny [m]

γ – ciężar właściwy wody [kg/m^3]

ν – lepkość kinematyczna wody [m^2/s]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

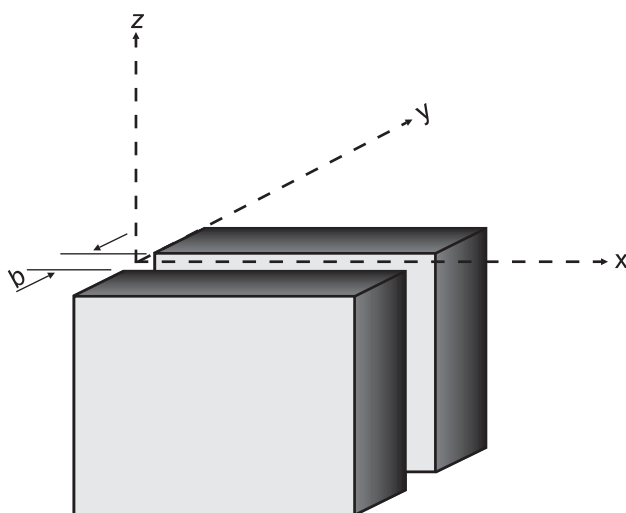


Fig. 4.1. Model pojedynczego spękania

Oznacza to, że w szczelinie płaskiej w stanie ustalonym obowiązuje prawo przepływu identyczne z prawem przepływu w ośrodku porowatym, tzn. opisywane prawem Darcy:

$$\underline{q} = -k_f \cdot \nabla \Phi \quad [4.42]$$

gdzie:

$$k_f = \frac{b^2}{12} \cdot \frac{g}{v} - \text{współczynnik filtracji szczeliny (fissure) [m/s]}. \quad [4.43]$$

W rezultacie przepływ całkowity w szczelinie wynosi:

$$\underline{Q} = -T_f \cdot \nabla \Phi \quad [4.44]$$

lub równoważnie:

$$Q_x = -T_f \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad [\text{m}^3/\text{s na 1 m wysokości szczeliny liczonej w kierunku } x] \quad [4.45]$$

$$Q_z = -T_f \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad [\text{m}^3/\text{s na 1 m szerokości szczeliny liczonej w kierunku } x] \quad [4.46]$$

gdzie:

$$T_f = k_f \cdot b = \frac{b^3}{12} \cdot \frac{g}{v} - \text{współczynnik przewodności hydraulicznej szczeliny [m}^2/\text{s]}.$$

Wzór na przewodność hydrauliczną w szczelinie płaskiej nosi nazwę prawa sześciennego.

Wzór [4.44] podlega dwóm istotnym modyfikacjom: gdy szczelina charakteryzuje się zmienną szerokością b wzdłuż kierunku y i stałą szerokością wzdłuż kierunku x (fig. 4.2) oraz gdy ponadto jednocześnie występują dwie składowe przepływu – w kierunku y oraz w kierunku x (fig. 4.3).

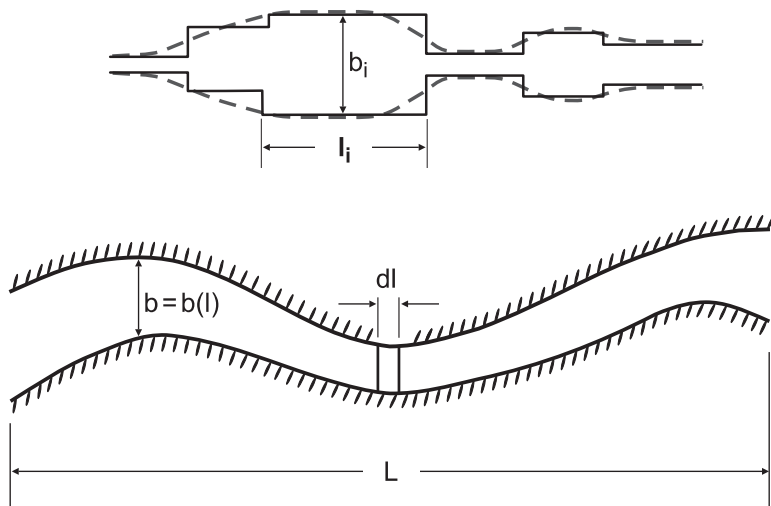


Fig. 4.2. Szczelina o zmiennej szerokości

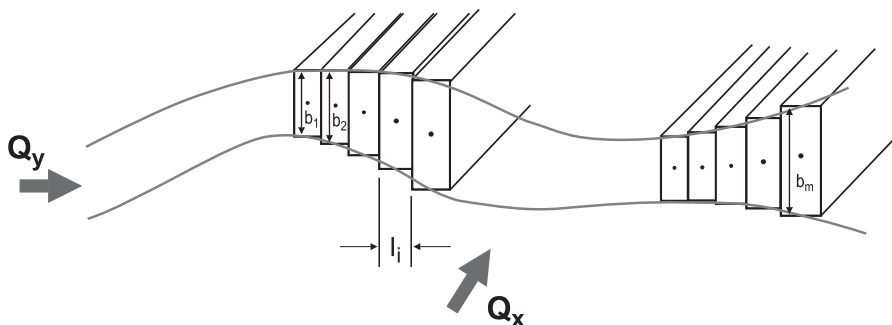


Fig. 4.3. Dwie składowe przepływu przez szczelinę

1. Przepływ w kierunku, w którym szerokość szczeliny jest zmienna – kierunek y .

Gdy długość szczeliny wynosi L , a rozkład szerokości szczeliny w kierunku jej zmienności jest opisywany funkcją $b(l)$, wówczas wyznacza się efektywny sześcián szerokości szczeliny b_{ef} jako średnią harmoniczną, tj.

$$b_{ef}^3 = \int_0^L dl \left[\int \frac{dl}{b^3(l)} \right]^{-1} \quad [4.47]$$

W sytuacjach praktycznych efektywną szerokość szczeliny b_{ef} wyznacza się z histogramu:

$$b_{ef}^3 = \frac{\sum_{k=1}^{N_{sz}} l_k}{\sum_{k=1}^{N_{sz}} \frac{l_k}{(b_k)^3}} \quad [4.48]$$

gdzie:

l_k , ($k = 1, \dots, N_{sz}$) – sumaryczna długość, na której szerokość szczeliny wynosi b_k [m]

N_{sz} – liczba klas, na które zostały podzielone szerokości występujące w szczelinie [–]

b_k – szerokość szczeliny przypisana do k -tej klasy ($k = 1, \dots, N_{sz}$) [m].

Wówczas współczynnik przewodności hydraulicznej wynosi

$$T_f = \frac{b_{ef}^3}{12} \cdot \frac{g}{v}, \quad [4.49]$$

a przepływ w kierunku, w którym szerokość szczeliny jest zmienna – Q_y [m^3/s] – wynosi:

$$Q_y = \frac{b_{ef}^3}{12} \cdot \frac{g}{v} I_y B \quad [4.50]$$

gdzie:

B – poprzeczna szerokość szczeliny [m]

I_y – podłużny spadek wysokości hydraulicznej [–].

2. Przepływ w kierunku, w którym szerokość szczeliny pozostaje stała – kierunek x .

Składową przepływu Q_x [m^3/s] oblicza się ze wzoru:

$$Q_x = \sum_{k=1}^{N_{sz}} l_k \frac{b_k^3}{12} \cdot \frac{g}{v} I_x \quad [4.51]$$

gdzie:

I_x – poprzeczny spadek wysokości hydraulicznej [–]

l_k – długość, na której szczelina ma szerokość b_k ($k = 1, \dots, N_{sz}$).

4.3.2. Model przepływu w ortogonalnej sieci spękań

Gdy rozważany ośrodek spękany składa się z dwóch ortogonalnych rodzin równoległych spękań (fig. 4.4), o rozwartościach odpowiednio $\{b_i; i = 1, \dots, m_1\}$ oraz $\{b_j; j = 1, \dots, m_2\}$, gdzie m_1 i m_2 – liczba spękań przypadających na jednostkę długości w dwóch prostopadłych kierunkach, wówczas całkowity przepływ i współczynnik filtracji są wyznaczane z następujących wzorów:

$$Q = Q_{m_1} + Q_{m_2} = k_f I \cdot H \cdot L \quad [4.52]$$

$$k_f = \frac{1}{12L} \frac{g}{v} \left[\sum_{i=1}^{m_1} b_i^3 + \sum_{j=1}^{m_2} b_j^3 \right] \quad [4.53]$$

gdzie:

L, H – szerokość poprzeczna i wysokość skały [m]

I – spadek wysokości hydraulicznej wzdłuż szczelin [–].

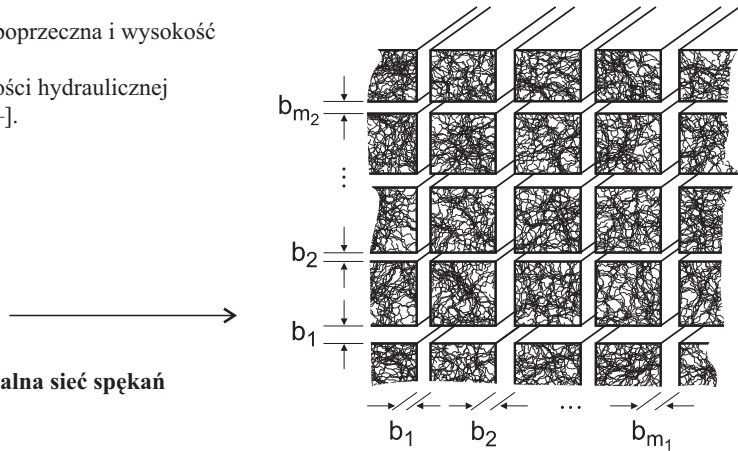


Fig. 4.4. Ortogonalna sieć spękań

4.3.3. Model przepływu w sieci równoległych i ciągłych spękań w skale porowatej

Jeśli układ równoległych i ciągłych spękań w skale porowatej (fig. 4.5) jest traktowany (razem ze skałą macierzystą) jako *continuum*, wówczas efektywny współczynnik filtracji k_{ef} tego *continuum* wynosi:

$$k_{ef} = \frac{b_f}{d_f} k_f + k_p \quad [4.54]$$

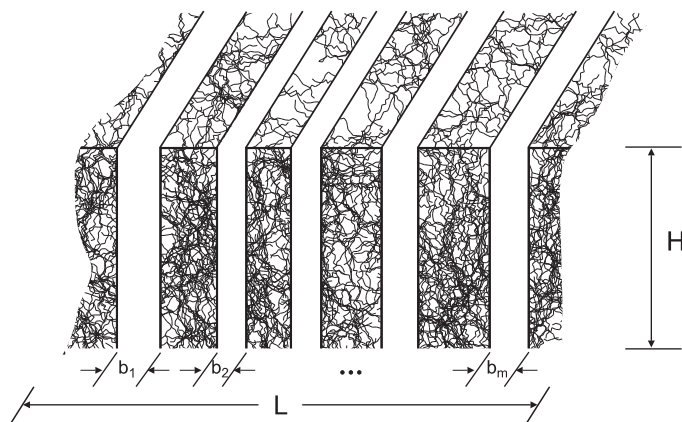


Fig. 4.5. Sieć równoległych i ciągłych spękań

gdzie:

d_f – średni odstęp między równoległymi szczelinami [m]

b_f – średnia szerokość szczelin [m]

k_f – średni współczynnik filtracji w szczelinach [m/s]

k_p – współczynnik filtracji macierzystej skały porowatej [m/s],

a moduł przepływu właściwego w kierunku spadku hydraulicznego I oraz przepływ całkowity przez zastępcze *continuum* wynoszą:

$$q = k_{ef} I \quad [4.55]$$

$$Q = k_{ef} I \cdot H \cdot L \quad [4.56]$$

4.3.4. Model przepływu w losowej sieci spękań w skałe porowatej

W przypadku losowej sieci spękań uśredniony przepływ właściwy wyznacza się w procesie dwukrotnego uśredniania – po przepływie w szczelinie (podobnie, jak miało to miejsce w przypadku pojedynczej szczeliny) oraz uśredniając po elementarnej objętości odniesienia (*Reference Elementary Volume* – REV) po wszystkich szczelinach w spękaną skałę. Przepływ w dowolnej szczelinie o szerokości b jest wywołany przez składową styczną do powierzchni szczeliny uśrednionego gradientu wysokości hydraulicznej $I = (I_x, I_y, I_z)$ (fig. 4.6).

Składowa ta $-I^* = (I_x^*, I_y^*, I_z^*)$, jest jednoznacznie określona przez I oraz wektor prostopadły do płaszczyzny szczeliny $\underline{v} = (v_1, v_2, v_3)$, gdzie v_1, v_2, v_3 – cosinusy kierunkowe wyznaczające orientację położenia szczeliny w przestrzeni:

$$I_j^* = I_i (\delta_{ij} - v_i v_j) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad [4.57]$$

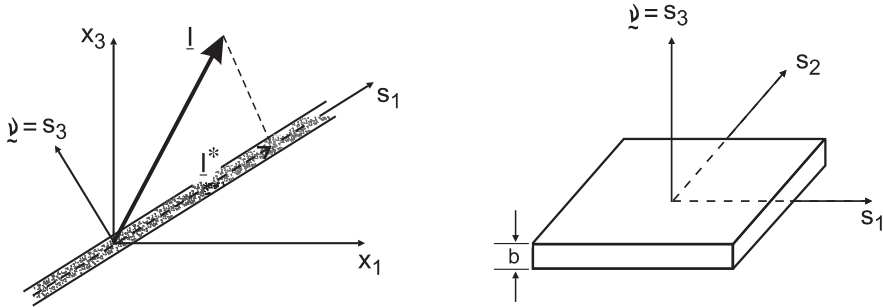


Fig. 4.6. Szczelina w losowej sieci spękań

(S_1, S_2, S_3) – lokalny układ współrzędnych szczeliny

Uśredniając dwukrotnie każdą ze składowych $\underline{I}^*$, otrzymuje się wzory umożliwiające wyznaczenie przepływu właściwego oraz zastępczego współczynnika filtracji w *continuum*, składającym się z losowej sieci spękań w skale porowatej:

$$\underline{q} = \underline{\underline{K_{ef}}} \underline{I} \quad [4.58]$$

$$\underline{\underline{K_{ef}}} = \left\{ k_p + \frac{b^2}{12} \frac{g}{v} (\overline{\delta_{ij} - v_i v_j}) \right\} \quad [4.59]$$

gdzie:

k_p – współczynnik filtracji skały porowatej [m/s]

$(\cdot)$ – operator uśredniania statystycznego po elementarnej objętości odniesienia (REV).

4.3.5. Model przepływu nieustalonego

Powyżej były rozważane wyłącznie przepływy ustalone w spękanych skałach porowatych. Gdy analizuje się stany nieustalone, należy wziąć pod uwagę cechę spękanego ośrodka porowatego, zwaną podwójną porowatością. Spękany ośrodek porowaty może być bowiem uważany za mieszaninę dwóch rodzajów *continuum*, charakteryzujących się dwiema wartościami porowatości. W stanie przepływu ustalonego podwójna porowatość jest uwzględniana *implicite* w postaci efektywnego (zastępczego) współczynnika filtracji. Jednak w stanach nieustalonych transmisja ciśnienia odbywa się inaczej w szczelinach, a inaczej w porowatej matrycy skały (szybciej w szczelinach, a wolniej w porach). Biorąc ponadto pod uwagę wymianę masy pomiędzy szczelinami a ośrodkiem porowatym, Barenblatt (Barenblatt, Zeltov, 1960) wyprowadził wzór umożliwiający wyznaczenie przepływu właściwego w układzie, w którym pojedyncza szczelina znajduje się w skale porowatej:

$$\underline{q} = \frac{\kappa_f}{\mu} \nabla p_f - \frac{\kappa_f \rho g \beta_o}{\alpha} \frac{\partial \nabla p_f}{\partial t} \quad [4.60]$$

gdzie:

p_f – ciśnienie w szczelinie [Pa]

$$\begin{aligned} \beta_o & - \text{współczynnik pojemności sprężystej wody i ośrodka porowatego} [\text{Pa}^{-1}] \\ \kappa_f & = \frac{K_f}{\rho g} - \text{współczynnik przepuszczalności szczeliny} [\text{m}^2] \\ \alpha & - \text{parametr charakteryzujący intensywność wymiany masy pomiędzy szczeliną} \\ & \quad \text{a ośrodkiem porowatym} [1/\text{s}] \\ \mu & - \text{lepkość dynamiczna wody} [\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}]. \end{aligned} \quad [4.61]$$

Wyznaczenie przepływu właściwego w takim układzie wymaga nie tylko znajomości gradientu ciśnienia w szczelinie, ale także szybkości zmian tego gradientu.

4.4. Modele transportu masy

Zjawisko przemieszczania się jonów lub cząsteczek innych niż H_2O w strumieniu wody podziemnej nazywa się zjawiskiem migracji lub transportu masy. W dalszym ciągu jest podany prosty opis zjawiska transportu substancji rozpuszczonych w wodzie w skałach porowatych. Szczegółowy opis procesów towarzyszących migracji substancji rozpuszczonych w strumieniu wody podziemnej znajduje się w poradniku Małeckiego i in. (Małecki red., 2006).

Poniżej są przywołane trzy podstawowe procesy fizyczne, związane z migracją substancji rozpuszczonych w strumieniu wody podziemnej: proces adwekcji, proces dyfuzji oraz proces dyspersji mechanicznej. Makroskopowo są opisywane one przez trzy rodzaje strumieni masy, wywołane przez wymienione procesy. Każdy ze strumieni jest mierzony w tych samych jednostkach – w kilogramach masy substancji rozpuszczonej przenikającej w ciągu jednostki czasu (1 s) przez jednostkową powierzchnię poprzeczną do ruchu cząsteczek (1 m^2), tj. $[J] = \text{kg s}^{-1}/\text{m}^2$. W przedstawionych poniżej opisach zjawisk adwekcji, dyfuzji i dyspersji przyjęto, że pole prędkości charakteryzujące filtrację wody w ośrodku porowatym (w gruncie) jest niezależne od stężeń substancji rozpuszczonych w wodzie. Sytuacja przeciwna, charakterystyczna dla tzw. przepływów gęstościowych (np. dla interakcji wód słodkich i zasolonych), choć dość często spotykana w praktyce hydrogeologicznej, nie jest omawiana w niniejszym Informatorze ze względu na zaawansowany aparat matematyczny niezbędny do ilościowego opisu zjawisk wówczas zachodzących. Zainteresowany Czytelnik może znaleźć odpowiednie informacje na ten temat w literaturze poradnika Małeckiego i in. (Małecki red., 2006).

4.4.1. Adwekcja

Adwekcja (unoszenie lub przenoszenie adwekcyjne) jest podstawowym sposobem, w jaki cząsteczki/jony substancji rozpuszczonej zmieniają swoje położenie w środowisku wód podziemnych. Cząsteczki te, zewsząd otoczone przez cząsteczki wody, poruszają się z różnymi co do wartości i kierunku prędkościami. Pomijając bardzo krótki okres upływający od momentu, w którym cząsteczki substancji rozpuszczonej (zanieczyszczenia) dostały się do strumienia wody, można przyjąć, że w wyniku losowych zderzeń z cząsteczkami H_2O , w każdym późniejszym momencie czasu średnia (makroskopowa) prędkość tych cząsteczek jest równa średniej prędkości porowej v_p cząsteczek wody. Ten prosty model transportu masy substancji rozpuszczonej w wodach podziemnych ma swoje uzasadnienie teoretyczne w procesie przechodzenia ze skali mikroskopowej do skali makroskopowej i znajduje swoje potwierdzenie w licznych badaniach terenowych. W rezultacie przyjęcia takiego modelu procesu unoszenia cząsteczek substancji rozpuszczanej przez strumień wody, (makroskopowy) strumień adwekcji tej substancji wyraża się wzorem:

$$\underline{J}_{adv} = C \cdot \underline{q} \quad [4.62]$$

lub równoważnie:

$$\underline{J}_{adv} = C \cdot n \cdot \underline{v}_p \quad [4.63]$$

gdzie:

- C – stężenie substancji rozpuszczonej w wodzie [kg/m^3]
- $\underline{q}$ – prędkość filtracji (strumień objętościowy wody) [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$]
- $\underline{v}_p$ – prędkość porowa cząsteczek wody [m/s]
- n – współczynnik porowatości efektywnej [-].

Wzór [4.62] można zapisać także w postaci:

$$\underline{J}_{adv} = n \cdot \underline{J}_{adv}^* \quad [4.64]$$

gdzie:

$$\underline{J}_{adv}^* = C \cdot \underline{v}_p \quad [4.65]$$

Strumień $\underline{J}_{adv}^*$ reprezentuje makroskopowy strumień adwekcyjny w wodzie porowej, natomiast $\underline{J}_{adv}^*$ jest miarą makroskopowego strumienia adwekcyjnego w całej przestrzeni.

4.4.2. Dyfuzja

W przypadku substancji rozpuszczonych w wodzie proces dyfuzji polega na izotropowym rozpraszaniu cząsteczek tej substancji w wyniku termicznych ruchów cząsteczek wody, które zderzając się z cząsteczkami danej substancji i przekazując im pęd, zmieniają ich prędkość i kierunek poruszania się. Izotropowość rozpraszania dyfuzyjnego oznacza, że żaden z wynikowych kierunków poruszania się cząsteczek danej substancji nie jest uprzywilejowany. Ponadto, dyfuzja zachodzi w ośrodku wodnym nawet wówczas, gdy woda jest w stanie spoczynku, tj. gdy jej makroskopowa prędkość jest równa zero w każdym punkcie cieczy. W przypadku wody płynącej proces transportu dyfuzyjnego danej substancji nakłada się na jej transport adwekcyjny. W wodach podziemnych w przeważającej liczbie przypadków dominuje proces adwekcji, jednak w obszarach stagnacji wód dyfuzja może być procesem znaczącym. Dyfuzja obserwowana i opisywana na poziomie makroskopowym jawi się jako migracja substancji rozpuszczonej w wodzie od obszarów, w których występują większe jej stężenia, do miejsc, w których stężenia są mniejsze. Rozpraszanie dyfuzyjne w nieograniczonej przestrzeni medium (np. w wodach powierzchniowych), ujemuje makroskopowe prawo Ficka wiążące strumień transportu dyfuzyjnego ze spadkiem (gradientem) stężenia rozważanej substancji:

$$\underline{J}_{dyf}^o = -D_d^o \text{grad}(C) \quad [4.66]$$

gdzie:

- D_d^o – współczynnik dyfuzji molekularnej wyznaczony w nieograniczonej izotropowej przestrzeni [m^2/s].

Prawo Ficka jest więc prostym prawem liniowym wiążącym makroskopową przyczynę – gradient stężenia substancji rozpuszczonej, z makroskopowym skutkiem – strumieniem masy tej substancji. Współczynnik dyfuzji molekularnej D_d^o zależy od rodzaju substancji rozpraszanej.

nej i od rodzaju rozpraszającego medium. Wartości współczynników dyfuzji molekularnej dla większości par substancja rozpraszana–medium, mających znaczenie praktyczne, są zamieszczone w powszechnie dostępnych tablicach i poradnikach chemicznych (np. Lide, 2001). W przypadku ustalonego medium rozpraszającego (np. wody), D_d^o zależy już tylko od rodzaju substancji rozpuszczonej. Zależy także od temperatury, co jest zrozumiałe, gdyż temperatura jest miarą średniej energii kinetycznej cząstek rozpraszających. Wartości współczynnika dyfuzji molekularnej wybranych jonów w wodzie w temperaturze 25°C podaje Domenico (Domenico, Schwartz, 1990).

W sytuacji, gdy dyfuzja zachodzi w wodzie płynącej w porach ośrodka skalnego, przestrzeń, w której są rozpraszane cząsteczki substancji rozpuszczonej w wodzie, jest ograniczona. W związku z tym do prawa Ficka wprowadzona jest poprawka zmniejszająca współczynnik dyfuzji molekularnej. Współczynnik ten bierze pod uwagę ważny aspekt związany z geometrią przestrzeni, w której zachodzi rozpraszanie dyfuzyjne, mianowicie skomplikowaną topologię porów. Jest ona scharakteryzowana przez współczynnik krętości τ , zdefiniowany jako stosunek długości drogi w połączonych porach, dostępnej dla cząsteczki przemieszczającej się w próbce ośrodka porowatego (L_e), do długości próbki (L). Współczynnik krętości τ jest więc wielkością większą od jedności. Według Beara (1972) wartości współczynnika τ zmieniają się od 1,11 do 1,33. Niektórzy autorzy definiują współczynnik krętości jako odwrotność τ . W niniejszym Informatorze pozostawiona jest jednak oryginalna definicja Beara. Zmodyfikowane prawo Ficka, określające dyfuzyjny strumień masy w wodzie porowej przyjmuje wówczas postać (Zheng, Bennett, 2002):

$$\underline{J}_{dyf}^* = -D_d^* grad(C) \quad [4.67]$$

gdzie:

D_d^* – efektywny współczynnik dyfuzji [m^2/s] związany ze współczynnikiem dyfuzji molekularnej D_d^o (określanym w tablicach chemicznych dla nieograniczonej przestrzeni rozpraszania) następującą zależnością:

$$D_d^* = \frac{1}{\tau} D_d^o \quad [4.68]$$

τ – współczynnik krętości [–].

Fakt, że tylko w części całej przestrzeni fizycznej może odbywać się przepływ wody, a wraz z nią transport substancji rozpuszczonej (mianowicie w porach ośrodka gruntowego) uwzględnia się, definiując strumień masy w całej przestrzeni jako iloczyn strumienia masy w wodzie porowej przez współczynnik porowatości efektywnej n :

$$\underline{J}_{dyf} = n \cdot \underline{J}_{dyf}^* = -n \cdot D_d^* grad(C) \quad [4.69]$$

Obydwa typy dyfuzyjnego strumienia masy danej substancji – [4.67] i [4.69], są uwzględnione w następnym rozdziale w rozważaniach dotyczących całkowitego strumienia dyspersyjnego.

4.4.3. Dyspersja

Zjawisko rozpraszania dyspersyjnego cząsteczek substancji rozpuszczonej w strumieniu wody podziemnej jest związane z nierównomiernością pola prędkości wody. Proces dyspersji jest znacznie bardziej skomplikowany, niż poprzednio omówione mechanizmy transportu masy

w ośrodku porowatym, wymaga bowiem przeanalizowania szeregu czynników powodujących występowanie niejednorodności pola prędkości wody. Powszechnie jest stosowane podejście zaproponowane przez Beara (1972), uwzględniające efekt geometrycznego (lub mechanicznego) rozpraszania cząstek rozpuszczonych w wodzie, wywołany obecnością ziaren skały porowatej. Efekt ten, zwany dyspersją mechaniczną, opisuje się makroskopowo w sposób analogiczny do opisu procesu dyfuzji, tj.:

$$\underline{J}_{dysp}^* = -D_{dysp}^* grad(C) \quad [4.70]$$

Oznaczając jako $\underline{J}^*$ całkowity strumień masy danej substancji w wodzie wypełniającej przestrzeń porową, otrzymuje się ostatecznie:

$$\underline{J}^* = \underline{J}_{adw}^* + \underline{J}_{dyf}^* + \underline{J}_{dysp}^* \quad [4.71]$$

Ze względu na analogiczny opis procesów dyfuzji i dyspersji, łączy się je niekiedy i nazywa procesem dyspersji hydrodynamicznej, tj.:

$$\underline{J}^* = C \cdot \underline{v}_p - D_h^* grad(C) \quad [4.72]$$

gdzie:

$$D_h^* = D_d^* + D_{dysp}^* - \text{współczynnik dyspersji hydrodynamicznej [m}^2/\text{s]}. \quad [4.73]$$

Makroskopowy strumień masy $\underline{J}^*$ w wodzie wypełniającej pory skały oraz strumień $\underline{J}$ opisujący transport w *continuum* (wypełniającym całą przestrzeń) są związane prostą zależnością:

$$\underline{J} = n \cdot \underline{J}^* \quad [4.74]$$

Podstawienie wzoru [4.72] do [4.74] pozwala wyrazić całkowity makroskopowy strumień masy substancji w dowolnym punkcie całej przestrzeni (obejmującej zarówno wodę, jak i ziarna gruntu) za pomocą wielkości makroskopowych C oraz $\underline{v}_p$ określonych w wodzie wypełniającej pory gruntu:

$$\underline{J} = n C \underline{v}_p - n D_h^* grad(C) \quad [4.75]$$

Model procesu transportu substancji rozpuszczonej w wodzie [4.75] ma ważne uogólnienie związane z faktem, że właściwości dyspersyjne ośrodka skalnego wykazują anizotropowość, czyli taką cechę ośrodka porowatego, która oznacza zależność każdej ze składowych $\underline{J}_{dysp,1}^*$, $\underline{J}_{dysp,2}^*$, $\underline{J}_{dysp,3}^*$ strumienia dyspersyjnego od wszystkich składowych gradientu stężenia.

W wielu realnych sytuacjach współczynnik dyspersji nie jest więc wielkością skalarną, lecz macierzą $\underline{D}_{dysp}^*$, która w przypadku ortotropowości ośrodka skalnego jest macierzą diagonalną. Zatem także $\underline{D}_h^*$ jest macierzą diagonalną. Jej najprostszą postać przedstawia poniższy wzór:

$$\underline{\underline{D}}_h^* = \begin{bmatrix} D_d^* + \alpha_L \underline{v}_p & 0 & 0 \\ 0 & D_d^* + \alpha_T \underline{v}_p & 0 \\ 0 & 0 & D_d^* + \alpha_T \underline{v}_p \end{bmatrix} \quad [4.76]$$

Wektor reprezentujący strumień transportu danej substancji w całej przestrzeni wyraża się ostatecznie wzorem analogicznym do wzoru [4.75]:

$$\underline{J} = n D \underline{v}_p - n D_h^* \underline{grad} (C) \quad [4.77]$$

Wzór [4.77] pozwala szacować wypadkowy strumień masy substancji rozpuszczonej w wodzie transportowanej adwekcyjnie, dyfuzyjnie i dyspersyjnie w dowolnym miejscu warstwy wodonośnej pod warunkiem znajomości pola prędkości $\underline{v}_p$ oraz pola stężenia C . Pole prędkości $\underline{v}_p$ jest wyznaczane zazwyczaj z równania przepływu wód podziemnych i zastosowania prawa Darcy, natomiast pole stężeń wymaga rozwiązania tzw. równania adwekcji–dyspersji (A–D), które jest złożeniem prawa ciągłości i wzoru [4.77].

4.4.4. Prawo ciągłości

Prawo ciągłości w trójwymiarowym *continuum* oznacza, że masa cząsteczek substancji rozpuszczonej w wodzie jest zachowana w przypadku braku źródeł lub upustów tej substancji. Gdy źródła/upusty występują, ich działanie musi być *explicite* uwzględnione w postaci tzw. członów źródłowych (upustowych), opisujących ilość masy danej substancji powstającej (znikającej) w jednostce objętości w jednostce czasu. Członów źródłowe przyjmują wartości dodatnie, podczas gdy członów upustowe są ujemne. Ich występowanie w prawie ciągłości wynika z działania procesów fizykochemicznych lub reakcji chemicznych, jakim podlegają substancje rozpuszczone w wodzie. Prawo ciągłości dla pewnej substancji rozpuszczonej w wodzie płynącej w ośrodku porowatym jest opisane następującym wzorem:

$$\frac{\partial (nC)}{\partial t} = -\text{div}(\underline{J}) + n s_{fc} \quad [4.78]$$

gdzie:

- n – współczynnik porowatości efektywnej [–]
- C – stężenie substancji w wodzie [$\text{kg}/\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}$]
- $\underline{J}$ – strumień masy [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$]
- s_{fc} – człon źródłowo-upustowy [$\text{kg}/\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}/\text{s}$].

Prawa strona wzoru [4.78] jest sumą masy pozostawianej przez przepływający strumień danej substancji w jednostce objętości i w jednostce czasu oraz masy generowanej w jednostce objętości i w jednostce czasu przez źródło. Natomiast lewa strona oznacza przyrost/ubytek ilości masy w jednostce objętości na jednostkę czasu. Równość lewej i prawej strony oznacza wymaganie, by wielkości fizyczne wchodzące do wzoru [4.78] respektowały prawo zachowania masy.

4.4.5. Równanie transportu masy w strumieniu wód podziemnych

Podstawienie wzoru [4.77] bezpośrednio do prawa ciągłości [4.78] pozwala sformułować tzw. równanie adwekcji–dyspersji (równanie A–D). Przy założeniu, że ośrodek gruntowy nie ulega odkształceniu ($n = \text{const.}$), równanie A–D przyjmuje standardową postać (Furbish, 1997):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(\underline{D}_h^* \underline{grad} C) - \text{div}(C \underline{v}_p) + s_{fc} \quad [4.79]$$

By uzyskać jedno jednoznaczne rozwiązanie równania A–D, niezbędne jest:

- określenie warunku początkowego,
- sformułowanie odpowiednich warunków brzegowych.

Warunkiem początkowym jest funkcja C_0 reprezentująca rozkład przestrzenny stężenia w chwili $t = 0$, tj. $C(x, y, z, 0) = C_0(x, y, z)$ dla $(x, y, z) \in \Omega$, gdzie Ω – obszar przepływu.

Warunki brzegowe równania [4.79] muszą być określone dla wszystkich punktów na brzegu obszaru przepływu Ω , tj. dla $(x, y, z) \in \partial\Omega$, gdzie $\partial\Omega$ oznacza brzeg obszaru Ω , oraz dla chwil czasowych $t > 0$. Przyjmują one jedną z trzech standardowych postaci:

- warunku I rodzaju (zwanego też warunkiem Dirichleta), który definiuje zmienność czasową stężenia zanieczyszczenia $C(x, y, z, t)$ na pewnym segmencie brzegu $\partial\Omega_1$ za pomocą przyjętej na podstawie szacowania lub znanej funkcji $\tilde{C}(x, y, z, t)$, tj.

$$C(x, y, z, t) = \tilde{C}(x, y, z, t) \quad \text{dla } (x, y, z) \in \partial\Omega_1 \subset \partial\Omega \quad [4.80]$$

- warunku II rodzaju (zwanego warunkiem Neumanna), który definiuje zmienność czasową składowej normalnej (do brzegu) strumienia masy zanieczyszczenia $J_n(x, y, z, t)$ na pewnym segmencie brzegu $\partial\Omega_2$ za pomocą przyjętej na podstawie szacowania lub znanej funkcji $\tilde{J}_n(x, y, z, t)$, tj.

$$J_n(x, y, z, t) = \tilde{J}_n(x, y, z, t) \quad \text{dla } (x, y, z) \in \partial\Omega_2 \subset \partial\Omega \quad [4.81]$$

- warunku III rodzaju (zwanego warunkiem Cauchy'ego), który definiuje zmienność czasową kombinacji liniowej stężenia $C(x, y, z, t)$ oraz składowej normalnej (do brzegu) strumienia masy zanieczyszczenia $J_n(x, y, z, t)$ na pewnym segmencie brzegu $\partial\Omega_3$ za pomocą przyjętej na podstawie szacowania lub znanej funkcji $\tilde{\varphi}(x, y, z, t)$, tj.

$$\alpha \cdot C(x, y, z, t) + \beta \cdot J_n(x, y, z, t) = \tilde{\varphi}(x, y, z, t) \quad \text{dla } (x, y, z) \in \partial\Omega_3 \quad [4.82]$$

gdzie:

α, β – znane lub przyjęte współczynniki kombinacji liniowej $C(x, y, z, t)$ oraz $J_n(x, y, z, t)$.

Segmenty brzegu, na których są zdefiniowane różne warunki brzegowe, albo nie mają punktów wspólnych, albo (w przypadku dwuwymiarowym) mają 1 lub 2 punkty wspólne na linii brzegowej, albo (w przypadku trójwymiarowym) mają wspólną część pewnej linii na powierzchni brzegowej. Zawsze jednak warunki brzegowe muszą być zdefiniowane na segmentach pokrywających w sumie cały brzeg obszaru przepływu, tj. $\partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2 \cup \partial\Omega_3 = \partial\Omega$. Naturalnie, mogą występować sytuacje, gdy na brzegu obszaru przepływu występuje tylko jeden z typów lub tylko dwa typy warunków brzegowych. Wyjątek stanowi warunek II rodzaju, który nie może występować samodzielnie, gdyż prowadzi to do niejednoznaczności rozwiązania równania [4.79].

Konieczność definiowania warunku początkowego i warunków brzegowych nakłada dość oczywiste (choć często nie spełniane) wymaganie, by warunki te były wzajemnie spójne, tj. by w punktach wspólnych na brzegu warunki brzegowe określone na poszczególnych segmentach nie wprowadzały nieciągłości oraz by wartości warunku początkowego na brzegu były identyczne z wartościami warunków brzegowych dla chwili $t = 0$. Ponadto należy pamiętać, że zarówno warunek początkowy, jak i warunki brzegowe dla przepływu wody oraz dla transportu masy są znane jedynie w przybliżeniu i w związku z tym wnoszą do modelu tych procesów odrębne niepewności.

Rozwiązania analityczne równania [4.79] są znane jedynie dla sytuacji bardzo uproszczonych – jednorodnych i izotropowych warstw wodonośnych o nieskomplikowanych geometriach, prostych warunkach brzegowych i najczęściej dla przypadków przepływów ustalonych (migracji

ustalonej) o niskiej wymiarowości (np. Guidebook..., 1968; Van Genuchten, Alves, 1982). Choć wzory analityczne sprawiają wrażenie bardzo dokładnych, użyteczność rozwiązań analitycznych ogranicza się zwykle do jakościowego wykazania pewnych cech transportu, np. szacowania czasu przebywania cząsteczek zanieczyszczenia w warstwie wodonośnej, generalnego opisu migracji plamy zanieczyszczeń, stopnia redukcji stężenia substancji rozpuszczonej w wodzie w wyniku biodegradacji lub rozpadu promieniotwórczego itp. Powodem takiego stanu rzeczy jest fakt, że założenia poczynione w trakcie wyprowadzania rozwiązania analitycznego nie przystają do fizycznej rzeczywistości procesu migracji. Niemniej jednak wzory analityczne mają wciąż zastosowania – przeważnie do interpretacji wyników dobrze przygotowanych i kontrolowanych eksperymentów laboratoryjnych lub polowych.

Prawa strona wzoru [4.79] jest sumą masy pozostawianej przez przepływający strumień danej substancji w jednostce objętości i w jednostce czasu oraz masy wygenerowanej w jednostce objętości i w jednostce czasu przez źródło. Lewa strona równania reprezentuje przyrost/ubytek ilości masy w jednostce objętości na jednostkę czasu. Równość lewej i prawej strony wzoru [4.79] oznacza wymaganie, by było spełnione prawo zachowania masy. W przypadku, gdy człon s równania [4.79] jest członem upustowym, jego obecność powoduje odpowiednie zmniejszanie się stężenia migrującej substancji w wodzie. Typowym przykładem działania członu upustowego jest występowanie zjawiska sorpcji cząstek (jonów) substancji rozpuszczonej w wodzie na powierzchni ziaren ośrodka skalnego. W wielu ośrodkach skalnych można przyjąć, że makroskopowe stężenie substancji C oraz makroskopowe stężenie substancji zasorbowanej na powierzchni ciała stałego są w szerokim przedziale prędkości przepływu wzajemnie proporcjonalne. Odpowiedni współczynnik proporcjonalności nosi nazwę współczynnika rozdziału danej substancji pomiędzy fazą ciekłą i fazą stałą i jest oznaczany jako K . W stanie równowagi chemicznej człon upustowy s_{fc} reprezentujący szybkość sorbowania się danej substancji na powierzchni fazy stałej jest proporcjonalny do szybkości zmian stężenia tej substancji w wodzie i daje się przedstawić w postaci:

$$s_{fc} = -K \frac{\partial C}{\partial t} \quad [4.83]$$

Gdy migracji substancji rozpuszczonej w wodzie towarzyszy zjawisko sorpcji, a człon źródłowy jest opisany wzorem [4.83], równanie transportu [4.79] przyjmuje prostszą postać:

$$\frac{\partial (1+K)C}{\partial t} = \text{div}(\underline{\underline{D_h^*}} \text{grad } C) - \text{div}(C \underline{\underline{v_p}}) \quad [4.84]$$

Równanie [4.84] można równoważnie zapisać:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}\left(\frac{D_h^*}{R} \text{grad } C\right) - \text{div}\left(C \frac{\underline{\underline{v_p}}}{R}\right) \quad [4.85]$$

gdzie:

$$R = 1 + K - \text{współczynnik retardacji [-]}.$$

Ta postać równania transportu substancji rozpuszczonych w wodzie jest szczególnie wygodna, gdyż został z niej wyeliminowany człon źródłowy związany z sorpcyjnym działaniem ośrodka skalnego – równanie ma formalnie postać równania transportu bez sorpcji. Stosowanie zmodyfikowanego równania [4.85] w sytuacji, gdy sorpcja na powierzchni ośrodka skalnego występuje (i jest w stanie równowagi wymiany jonów z wodą), sprowadza się do modyfikacji współczynnika

dyspersji hydrodynamicznej poprzez podzielenie go przez współczynnik retardacji R oraz do zmniejszenia wartości prędkości porowej R -krotnie. Iloraz współczynnika dyspersji i współczynnika retardacji występujący w równaniu [4.85] nosi nazwę pozornego współczynnika dyspersji, a prędkość porowa podzielona przez współczynnik retardacji jest nazywana też pozorną prędkością porową.

4.4.6. Zagadnienie niepewności w modelach przepływu wód podziemnych i transportu masy w strumieniu wody podziemnej

Ze względu na nieuniknioną niepewność towarzyszącą procesowi modelowania, wynik modelowania zawsze jest obciążony błędem. Podstawowe przyczyny niepewności w modelowaniu zostały przedstawione przez Van Geera (Van Geer i in., 1991):

- założenia i uproszczenia są niezbywalnym elementem procesu modelowania,
- dane uzyskane w dyskretnych punktach interpretuje się zwykle w modelach numerycznych jako zmienne i parametry uśrednione po objętości,
- w większości przypadków brak jest informacji dotyczących przestrzennej zmienności poszczególnych parametrów,
- warunki brzegowe oraz człony źródłowe są zazwyczaj znane tylko w przybliżeniu.

Schemat procesu modelowania przedstawia figura 4.7 (Guymon, 1994). Podkreślone wielkie litery wyznaczają podstawowe elementy procesu modelowania, który jest zdefiniowany jako proces przekształcający sygnał wejścia na sygnał wyjścia (odpowiedź). S oznacza system naturalny (rzeczywisty), który otrzymując sygnał $x(s, t)$ na wejściu (zmienny w czasie i przestrzeni) produkuje odpowiedź $y(s, t)$, również rozłożoną w czasie i przestrzeni. System naturalny S jest opisywany przez model M , który jest wynikiem abstrakcji, tj. zawiera tylko te zmienne, które są istotne z punktu widzenia celu, dla którego model powstał. Aby model mógł funkcjonować, potrzebne jest m.in. wyznaczenie lub estymowanie jego parametrów. Wartości parametrów określa się bezpośrednio lub pośrednio na podstawie informacji pomiarowej (empirycznej), pochodzącej z systemu pierwotnego S . W większości przypadków są one wyznaczane w postaci dyskretniej względem przestrzeni i czasu.

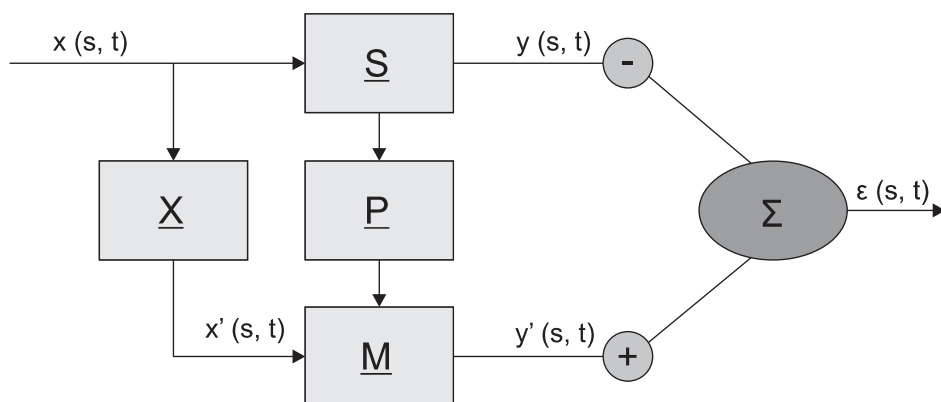


Fig. 4.7. Schemat procesu modelowania

Sygnałem wejścia do modelu x' jest skwantyfikowany sygnał wejściowy $x(s, t)$. Zarówno pomiar sygnału wejściowego, jak i jego kwantyfikacja, są źródłami błędów, który propaguje na wyjście modelu. Sygnał wyjścia y' – odpowiedź modelu – z powodu istnienia błędów w procesie modelowania nigdy nie pokrywa się z odpowiedzią systemu pierwotnego S . Różnica $\varepsilon(s, t)$ pomiędzy odpowiedziami y i y' stanowi błąd procesu modelowania. Wielkość tego błędu zależy od wielu czynników i może pochodzić od każdego z systemów M , P i X . Najczęściej wyróżnia się cztery rodzaje źródeł niepewności (błędów) decydujących o dokładności modelu systemu dynamicznego (Guymon, 1994):

- błędy związane z budową i ograniczeniami modelu,
- błędy związane z określeniem parametrów modelu,
- błędy związane z określeniem wymuszeń,
- błędy związane z określeniem stanu początkowego.

Problem adekwatności modelu do obiektu fizycznego nie jest omawiany w niniejszym Informatorze. Przyjmuje się, że modele przepływu wód podziemnych (prawo Darcy i prawo ciągłości) oraz transportu masy w ośrodku porowatym (prawo Ficka i prawo ciągłości) są dostatecznie dobrymi abstrakcjami reprezentującymi procesy fizyczne w ośrodku porowatym.

Bez względu na to, jak dobrze fizycznie uzasadnione i matematycznie opisane są procesy w modelowanym systemie rzeczywistym wód podziemnych, model numeryczny zakładający aproksymacje równań przepływu oraz transportu zanieczyszczeń sam w sobie stanowi źródło błędów. Jednak ze względu na to, iż współczesne metody numeryczne oraz współczesne komputery gwarantują wymaganą dokładność aproksymacji rozwiązań równań fizyki matematycznej, w niniejszym Informatorze przyczyny powstawania błędów w wynikach modelowania są rozpatrywane tylko w kategoriach niepewności związanych z określaniem parametrów oraz zmiennych wejściowych modelu.

Kolejnym źródłem błędów w procesie modelowania jest proces określania (estymowania, identyfikacji) parametrów modelu. Istnieje szereg metod empirycznych wyznaczania liczbowych wartości parametrów. W większości przypadków są to metody bazujące na małych objętościowych próbkach wody bądź gruntu. Otrzymana wartość parametru często reprezentuje tylko daną próbkę i w wielu przypadkach ekstrapolacja wyznaczonej eksperymentalnie wartości jako reprezentatywnej dla modelowanego podobszaru jest nieuzasadniona. Nawet przy założeniu, że warstwa wodonośna jest materiałem skalnym izotropowym i jednorodnym należy pamiętać, że sama metoda pomiarowa wyznaczania wartości parametru, czy to przeprowadzana w laboratorium, czy też bezpośrednio w terenie, wprowadza błąd, którego redukcja wymaga znaczącego zwiększenia liczby pobieranych próbek, a tym samym znaczącego zwiększenia nakładów finansowych na badania. W praktyce należy liczyć się z faktem niemożności redukowania błędu statystycznego na drodze znaczącego zwiększania liczby pobieranych próbek. W związku z tym oszacowanie błędu pomiarowego parametru (bądź zmiennej fizycznej) dla mało licznej próby jest kluczowym zagadnieniem przy szacowaniu niepewności w modelach hydrogeologicznych.

Zagadnienia określania:

- warunków początkowych (np. ustalanie rozkładu koncentracji zanieczyszczenia w chwili początkowej),
- warunków brzegowych (np. oszacowanie składowej normalnej strumienia wód regionalnych zasilających rozważany obszar),
- zasilania warstwy wodonośnej przez wody opadowe

stanowią poważny problem w praktyce modelowania matematycznego wód podziemnych.

Błędne określenie tych procesów ma bezpośredni wpływ na precyzję rozwiązań modelu. Opis systemu wód podziemnych nie jest więc prosty, a wyznaczenie zmiennych i parametrów modelu obarczone błędami. W niniejszym Informatorze zostało zaproponowane podejście, w którym wnioskowanie ilościowe o zachowaniu się systemu wód podziemnych za pomocą symulacji komputerowych odbywa się nie tylko na drodze przyjęcia pewnych wartości parametrów i zmiennych, ale również poprzez uwzględnienie ich niepewności. Innymi słowy, obok modelu matematycznego procesów hydrogeologicznych rozważać należy także modele niepewności zmiennych i parametrów. Tym samym także uzyskane wyniki obliczeń modelowych są interpretowane w analogiczny sposób, jak parametry i zmienne wejściowe, tj. zawierają niepewność.

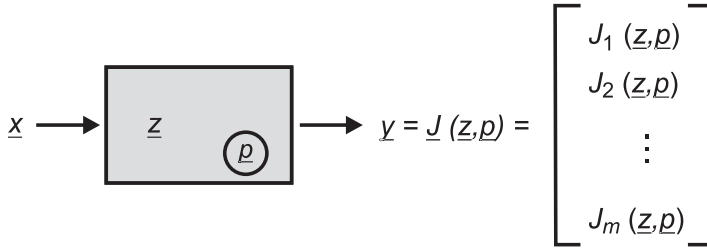
4.4.7. Metody oceny wpływu niepewności danych na wynik modelowania transportu zanieczyszczeń

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione metody stosowane do oceny wpływu niepewności parametrów i zmiennych na wynik modelowania transportu zanieczyszczeń w strumieniu wody podziemnej. Reprezentują one dwa rodzaje podejścia do zagadnienia oceny niepewności – podejście deterministyczne oraz podejście statystyczne.

Podejście deterministyczne. Według teorii systemów, podejście deterministyczne jest systemem, który tak samo przygotowany zachowuje się identycznie w wyniku pojawienia się identycznego wymuszenia. Proces modelowania systemu dynamicznego polega na określeniu zestawu parametrów i zmiennych wejściowych systemu oraz powiązaniu ich ze zmiennymi wyjściowymi, tj. zmiennymi, które są interesujące ze względu na badane zagadnienie. Przeprowadzenie symulacji systemu polega na wyznaczeniu numerycznych wartości reakcji modelu matematycznego reprezentującego system dla wartości danych – parametrów i zmiennych wejściowych – określonych przez osobę przeprowadzającą modelowanie. W zależności od wiedzy modelującego, zbiór danych może być przy tym interpretowany jako najbardziej prawdopodobny albo jako zaobserwowana realizacja danych.

Wynik symulacji procesu migracji zanieczyszczenia w wodach podziemnych często jest prezentowany w postaci izolinii wartości stężeń danej substancji. Takie podejście, choć szeroko stosowane w rozwiązywaniu problemów przepływu wód podziemnych oraz migracji zanieczyszczeń w ośrodku gruntowym, nie określa zwykle wpływu niepewności danych wejściowych na końcowe wyniki modelowania. Czasami wykonuje się tzw. analizę czułości modelu (Gorelick i in., 1993), która polega na przeprowadzeniu szeregu symulacji pozwalających na określenie wpływu zmian wartości pojedynczych parametrów lub zmiennych na końcowy wynik. Analiza ta jednak bardziej określa charakterystykę samego modelu – jego czułość na zmianę poszczególnych danych, nie uwzględniając wielkości niepewności danych ani efektu jednoczesnego nakładania się (synergizmu) niepewności występujących w zespole danych. Deterministyczną analizę czułości przeprowadził Louks (Louks, McKinney, 1990). Poniżej są przedstawione podstawowe wyniki tej analizy.

Przedmiotem analizy czułości jest wyznaczenie reakcji systemu dynamicznego na zmianę jego parametrów. Niech $J = (z, p)$ oznacza wektor reakcji systemu, gdy stan systemu równy jest z , a wektor parametrów wynosi $p = (p_1, p_2, \dots, p_s)^T$ (fig. 4.8).

**Fig. 4.8. Zmienne systemu dynamicznego**

x – wymuszenie, z – wektor stanu, p – wektor parametrów, y – reakcja (odpowiedź) systemu

Ponieważ wartość wektora stanu z zależy między innymi od wektora parametrów p poprzez równanie stanu:

$$\underline{f}(\underline{z}, \underline{p}) = 0, \quad [4.86]$$

zatem reakcję systemu można zapisać jako:

$$\underline{y} = \underline{J}(\underline{z}(\underline{p}), \underline{p}). \quad [4.87]$$

Z równania stanu wynika, że:

$$\frac{d\underline{f}}{d\underline{p}} = \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} + \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{z}} \cdot \left[\frac{\partial \underline{z}}{\partial \underline{p}} \right] = 0 \quad [4.88]$$

stąd

$$\frac{\partial \underline{z}}{\partial \underline{p}} = - \left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{z}} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} \quad [4.89]$$

Analiza czułości polega na obliczeniu elementów macierzy czułości:

$$\frac{d\underline{J}}{d\underline{p}} = \left[\frac{dJ_i}{dp_k} \right]_{\substack{i=1, \dots, m \\ k=1, \dots, s}} \quad [4.90]$$

Macierz $\frac{d\underline{J}}{d\underline{p}}$ można wyznaczyć z zależności [4.88]:

$$\frac{d\underline{J}}{d\underline{p}} = \frac{\partial \underline{J}}{\partial \underline{p}} + \frac{\partial \underline{J}}{\partial \underline{z}} \cdot \left[\frac{\partial \underline{z}}{\partial \underline{p}} \right] \quad [4.91]$$

Podstawiając [4.89] do [4.91], otrzymuje się ostateczny wzór na macierz czułości:

$$\frac{d\underline{J}}{d\underline{p}} = \frac{\partial \underline{J}}{\partial \underline{p}} - \frac{\partial \underline{J}}{\partial \underline{z}} \cdot \left[\frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{z}} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial \underline{f}}{\partial \underline{p}} \quad [4.92]$$

Macierz czułości $\frac{dJ}{dp}$ jest tradycyjnie wyznaczana na jeden z dwóch sposobów:

- poprzez wyznaczenie macierzy $\frac{\partial z}{\partial p}$ z równania [4.89] i podstawienie do równania [4.91],
- poprzez rozwiązanie tzw. równania sprzężonego.

W obu przypadkach należy rozwiązać dwa układy równań macierzowych algebraicznych, tj. z macierzą czułości jako niewiadomą.

W zagadnieniach przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń w warstwach wodonośnych wektor stanu składa się z dwóch podwektorów h oraz c , reprezentujących odpowiednio wysokość hydrauliczną oraz wartość stężenia substancji zanieczyszczającej w węzłach siatki dyskretyzacji: $z = (h, c)$. Wymiarowość wektorów stanu z jest więc dla przeciętnych zadań numerycznych rzędu kilkudziesięciu tysięcy ($\sim 10^4$). Biorąc pod uwagę to, że liczba parametrów rozpatrywanych w typowej analizie stanu zanieczyszczenia warstwy wodonośnej jest rzędu 10, można szacować, że liczba niewiadomych w równaniach czułości jest rzędu 10^5 . Wyznaczenie macierzy czułości wymaga więc rozwiązania dużych układów równań algebraicznych, na ogół nieposiadających żadnych upraszczających cech, takich jak symetria lub rzadkość. Również uwarunkowania takich układów równań algebraicznych są na ogół duże. W związku z tym zbieżność metod iteracyjnych (jeśli są stosowane) do poszukiwanych rozwiązań jest stosunkowo powolna.

Louks (Louks, McKinney, 1990) wyznaczył macierz ze wzoru [4.91] dla aproksymacji elementu skończonego równań przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń. Otrzymane równania stanu charakteryzowały się (typowo dla metody elementu skończonego) rzadkimi macierzami, co pozwoliło znacznie zredukować wymiarowość zadania algebraicznego. Wyniki uzyskane przez Louks'a były zbliżone do wyników otrzymanych metodą Monte Carlo.

Podejście statystyczne. Rozwiązywanie zagadnienia przepływu i migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych metodami statystycznymi wymaga potraktowania zmiennych wejściowych i parametrów jako zmiennych losowych oraz określenia odpowiednich funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Proces modelowania oznacza w tym wypadku, że także zmienne stanu i zmienne wyjściowe są interpretowane jako zmienne losowe. Wynikiem symulacji nie jest zatem pojedynczy przebieg czasoprzestrzenny określonej zmiennej, ale zbiór wszystkich przebiegów czasoprzestrzennych otrzymanych w kolejnych realizacjach modelu dla różnych (losowych) wartości danych.

Przy takim podejściu do oszacowania wpływu niepewności danych na precyzję oceny stanu środowiska wód podziemnych mogą być wykorzystane podstawowe charakterystyki statystyczne zmiennych wyjściowych. Przykładowo, rozkład przestrzenny wartości średniej stężenia danej substancji w warstwie wodonośnej można traktować jako wartość najbardziej prawdopodobną, a odchylenie standardowe bądź też współczynnik zmienności uznać za miarę niepewności wyniku modelowania spowodowaną niepewnością danych wprowadzanych do modelu.

Poniżej są przedstawione dwie metody statystyczne, które mogą służyć do oceny wpływu niepewności danych na wynik modelowania transportu zanieczyszczeń w wodach podziemnych.

Metodę Monte Carlo można stosować praktycznie w przypadku problemów, w których występują niepewności pochodzące jednocześnie od wielu parametrów czy zmiennych (Peck i in., 1988). Ogólnie, w metodzie Monte Carlo przyjmuje się założenie, że dla każdej niepewnej danej

wprowadzonej do modelu znana jest jej funkcja gęstości prawdopodobieństwa. Element arbitralności metody tkwi w wyborze rozkładów prawdopodobieństw branych pod uwagę parametrów lub zmiennych. W większości przypadków można przyjąć, że zmienne losowe, jakimi są poszczególne parametry i wyróżnione wymuszenia modelu, są losowo niezależne – wielowymiarowa funkcja gęstości prawdopodobieństwa opisująca wektor parametrów i wymuszeń jest zatem iloczynem odpowiednich rozkładów jednowymiarowych. W ogólnym przypadku można rozważać rozkłady wielowymiarowe uwzględniające wzajemne zależności pomiędzy losowymi parametrami. Metoda Monte Carlo polega na sekwencyjnym generowaniu liczb losowych dla poszczególnych zmiennych losowych i wyznaczaniu tym samym realizacji wszystkich parametrów i zmiennych wejściowych. Następnie, dla każdego zbioru wygenerowanych wartości parametrów i wymuszeń jest przeprowadzana deterministyczna symulacja reakcji modelu, a wynik symulacji jest zapamiętywany. Procedura: generowanie wartości danych, przeprowadzanie symulacji, zapamiętywanie wyników jest powtarzana zwykle dziesiątki tysięcy razy. Zmienne wyjścia są w konsekwencji traktowane jako zmienne losowe. Rezultatem generowania Monte Carlo jest wielowymiarowy histogram, w którym wybrane/interesujące zmienne wyjściowe modelu są zaklasyfikowane do odpowiednich przedziałów zmienności. Zestaw otrzymanych wyników służy w dalszym ciągu do wyznaczenia charakterystyk statystycznych takich jak średnia, wariancja czy też funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla zmiennych wyjścia.

Metoda Monte Carlo jest bardzo często stosowaną metodą ze względu na jej prostotę oraz łatwość adaptacji do problemów różnego typu. Technika ta wymaga jednak przeprowadzania wielu symulacji. Przy rozwiązywaniu zagadnień migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych często zdarza się, że czas obliczeń pojedynczej symulacji jest liczony w godzinach. Z drugiej strony, aby otrzymać miarodajne wyniki stosując metodę Monte Carlo, konieczne jest wykonywanie często dziesiątków tysięcy losowań realizacji danych modelowych. Liczba losowań zależy od liczby danych, ich zmienności oraz czułości modelowanego systemu na dane wejściowe (Peck i in., 1988). Dlatego zastosowanie tej metody może okazać się nieefektywne ze względu na stosunkowo słabą zbieżność odpowiednich estymatorów momentów statystycznych będących przedmiotem badania oraz długi czas potrzebny na wykonanie niezbędnych obliczeń. Rozwiązaniem może być zastosowanie metody dwupunktowej opisanej poniżej.

Metoda dwupunktowa (*two-point technique*) została zaproponowana po raz pierwszy przez Rosenbluetha w 1973 roku (Rosenblueth, 1975). Do problemów dotyczących przepływu w ośrodkach porowatych technika ta została wykorzystana w 1990 roku (Yen, Guymon, 1990). Metoda dwupunktowa, w odróżnieniu od metody Monte Carlo, nie wymaga znajomości (lub przyjęcia) funkcji gęstości prawdopodobieństwa, a jedynie wartości średniej i wariancji niepewnych danych.

Niech y' będzie zmienną wyjścia wyznaczoną na podstawie działania modelu. Jest ona funkcją m -różnych parametrów i zmiennych (p_i) obciążonych odpowiednimi niepewnościami:

$$y' = f(p_1, p_2, \dots, p_m) \quad [4.93]$$

Ze względu na to, iż niepewności parametrów p_i ($i = 1, 2, \dots, m$) są traktowane jako zmienne losowe, także y' jest zmienną losową. N -ty moment statystyczny dla wybranej zmiennej wyjścia jest estymowany następującym wzorem:

$$E[(y')^n] = \frac{1}{2^m} [(y'_{+...m})^n + (y'_{-...m})^n + (y'_{-...m})^n] \quad [4.94]$$

gdzie:

m – liczba parametrów i zmiennych obarczonych niepewnością
 $y'_{++...m}$ – wszystkie permutacje plusów i minusów na m pozycjach:

$$y' = f(\bar{p}_1 \pm s_{p_1}, \bar{p}_2 \pm s_{p_2}, \dots, \bar{p}_m \pm s_{p_m}) \quad [4.95]$$

$\bar{p}_i$ – wartość średnia parametru lub zmiennej

s_{p_i} – wartość odchylenia standardowego parametru lub zmiennej.

W przypadku, gdy niektóre z parametrów lub zmiennych są ze sobą skorelowane, N -ty moment statystyczny dla wybranej zmiennej wyjścia przybiera postać:

$$E[(y')^n] = \frac{1}{2^m} \sum (y'_{++...m})^n (P_{++...m}) \quad [4.96]$$

$$P_{++...m} = \frac{1}{2^m} \left[1 + \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j \delta_{ij} r_{ij} \right] \quad [4.97]$$

gdzie:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \geq j \\ 1 & i < j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, m$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{jeżeli } i\text{-ty indeks } P_{++...n} \text{ przyjmuje wartość dodatnią} \\ -1 & \text{jeżeli } i\text{-ty indeks } P_{++...n} \text{ przyjmuje wartość ujemną} \end{cases}$$

r_{ij} – współczynnik korelacji między poszczególnymi parametrami lub zmiennymi
i dla dwóch parametrów p_i oraz p_j , opisany wzorem:

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (p_{ik} - \bar{p}_i)(p_{jk} - \bar{p}_j)}{s_{p_i} s_{p_j}} \quad [4.98]$$

Metoda dwupunktowa w zestawieniu z metodą Monte Carlo nie wymaga przeprowadzenia dużej liczby obliczeń, a jedynie 2^m . Symulacje są przeprowadzane dla znanych (przyjętych za znane) wartości średnich i odchyłeń standardowych dla każdej danej obciążonej niepewnością. W metodzie dwupunktowej odchylenie standardowe jest miarą niepewności danej zmiennej. Dla wszystkich punktów modelowanego obszaru oraz dla ustalonego okresu przeprowadza się obliczenia przebiegu wybranych zmiennych systemu dynamicznego, używając modelu deterministycznego oraz zakładając, że każda dana ($p_i, i = 1, \dots, N$) obciążona błędem (niepewnością) przyjmuje jedną z dwóch wartości: $\bar{p}_i + s_{p_i}$ lub $\bar{p}_i - s_{p_i}$ (stąd nazwa metody). Należy zauważyć, że dla niewielkiej liczby parametrów czy zmiennych obarczonych niepewnością ilość koniecznych do wykonania obliczeń jest bardzo mała. Przykładowo, gdy ocenie jest poddawany system, w którym tylko dwa parametry są obciążone niepewnością, liczba koniecznych do wykonania symulacji wynosi 4. Jeżeli jednak ocenie jest poddawany system, w którym większa liczba parametrów czy zmiennych jest obciążona niepewnością, należy liczyć się z koniecznością przeprowadzenia większej liczby symulacji, np. dla 10 parametrów należy wykonać $2^{10} = 1024$ pojedynczych symulacji. W celu zilustrowania sposobu, jakim metoda dwupunktowa może być zastosowana dla określania wpływu niepewności danych na końcowy wynik modelowania, poniżej jest przedstawiony prosty przykład słynnego doświadczenia przeprowadzonego w 1856 r. przez H. Darcy (Sinicyn, 1998). Doświadczenie Darcy wykazało, że natężenie przepływu przez cylindryczną próbkę skały poro-

watej jest proporcjonalne do powierzchni przekroju przepływu i różnicy wysokości piezometrycznej, a odwrotnie proporcjonalne do długości przepływu:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad [4.99]$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [m^3/d]
- k – współczynnik filtracji [m/d]
- A – powierzchnia przekroju przepływu [m^2]
- ΔH – różnica wysokości piezometrycznej [m]
- ΔL – długość przepływu [m].

Niech zadanie polega na wyznaczeniu natężenia przepływu dla następujących wartości danych: $A = 0,25 \text{ m}^2$, $\Delta H = 1 \text{ m}$, $\Delta L = 2 \text{ m}$, $k = 10 \text{ m}/\text{d}$. Spośród wszystkich danych przyjęto, że współczynnik filtracji oraz przekrój poprzeczny są obarczone niepewnością. Zakładając, że wartość średnia obu parametrów wynosi odpowiednio $\bar{k} = 10 \text{ m}/\text{d}$, $\bar{A} = 0,25 \text{ m}^2$, a ich niepewności $s_k = 3 \text{ m}/\text{d}$, $s_A = 0,05 \text{ m}^2$, poniżej został przedstawiony sposób postępowania wykorzystujący metodę dwupunktową:

$$Q_{++} = (\bar{k} + s_k) \cdot (\bar{A} + s_A) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} = (10 + 3) \cdot (0,25 + 0,05) \cdot \frac{1}{2} = 1,95 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.100]$$

$$Q_{+-} = (\bar{k} + s_k) \cdot (\bar{A} - s_A) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} = (10 + 3) \cdot (0,25 - 0,05) \cdot \frac{1}{2} = 1,30 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.101]$$

$$Q_{-+} = (\bar{k} - s_k) \cdot (\bar{A} + s_A) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} = (10 - 3) \cdot (0,25 + 0,05) \cdot \frac{1}{2} = 1,05 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.102]$$

$$Q_{--} = (\bar{k} - s_k) \cdot (\bar{A} - s_A) \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} = (10 - 3) \cdot (0,25 - 0,05) \cdot \frac{1}{2} = 0,70 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.103]$$

Wartość średnia wynosi:

$$E[(Q)] = \frac{1}{2^2} (1,95 + 1,30 + 1,05 + 0,70) = 1,25 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.104]$$

W celu wyznaczenia wariancji, a następnie odchylenia standardowego, należy obliczyć średnią sumy kwadratów otrzymanych wyników (drugi moment Q):

$$E[(Q)^2] = \frac{1}{2^2} [(1,95)^2 + (1,30)^2 + (1,05)^2 + (0,70)^2] = 1,77125 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)^2 \quad [4.105]$$

Zgodnie z definicją wariancji:

$$V_x = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad [4.106]$$

Zatem:

$$V_Q = E(Q^2) - [E(Q)]^2 = 1,77125 - 1,5625 = 0,20875 \quad [4.107]$$

a odchylenie standardowe liczone jako pierwiastek z wartości wariancji wynosi:

$$s_Q = \sqrt{V_Q} = 0,457 \quad [4.108]$$

Wynik ten można również przedstawić za pomocą współczynnika zmienności (wyrażonego w %), definiowanego jako:

$$CV = \frac{s_Q}{\bar{Q}} \cdot 100\% \cong 37\% \quad [4.109]$$

Liczba ta oznacza, że przy występowaniu niepewności dwóch parametrów oszacowanie wyniku przeprowadzanych obliczeń, a więc wyznaczenie natężenia przepływu, jest obarczone 37-procentowym błędem. Otrzymany wynik można również interpretować w postaci:

$$Q = \bar{Q} \pm s_Q = 1,25 \pm 0,457 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad [4.110]$$

Dla powyższego przykładu przyjęto, że tylko dwa parametry są obarczone niepewnością. Należy jednak zauważyć, że przy występowaniu niepewności wszystkich czterech parametrów problem wymagałby przeprowadzenia 16 analogicznych obliczeń.

Podobne podejście może być zastosowane do oceny niepewności opisu procesów bardziej skomplikowanych, np. może dotyczyć niepewności granic plamy zanieczyszczeń przemieszczającej się w wodach podziemnych wokół składowiska odpadów (Sinicyn, 1998). Dzięki zastosowaniu metody dwupunktowej stosunkowo łatwo można wyznaczyć obszar niepewności granic plamy zanieczyszczenia, rozwiązując równanie transportu substancji zanieczyszczającej [4.79] oraz zakładając, że parametry tego równania są zmiennymi losowymi. Przykłady zastosowania metody dwupunktowej w zagadnieniach ochrony środowiska wód podziemnych zostaną przedstawione w dalszej części Informatora.

5. ZASADY SCHEMATYZACJI WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH JCWPd

Poprawność wyznaczenia systemów krążenia wód podziemnych powinna zostać zweryfikowana innymi niż modelowanie metodami. Są nimi metody hydrogeochemiczne, uwzględniające wzrost mineralizacji ogólnej i zmiany składu chemicznego wód w zależności od natężenia ich przepływu i wymiany oraz metody oznaczeń składu izotopowego, pozwalające określić czas przebywania lub przepływu oraz „wiek” wód podziemnych wyznaczany od momentu ich infiltracji do ośrodka skalnego do punktu poboru próbki. Należy jednak zauważyć, że zagadnienie przepływu wód podziemnych, nawet utrudnionego, nie dotyczy strefy wód stagnujących, wyłączonych z obiegu wywołanego gradientem hydraulicznym i gęstościowym w odniesieniu do dwóch różnych, niemieszających się płynów o różnym ciężarze właściwym. Nie muszą to być wody, które występują w najgłębszych partiach basenów sedymentacyjnych (nieckach hydrogeologicznych). Mogą też występować w położonych blisko powierzchni terenu seriach deltowych, np. w centralnej części Żuław Wiślanych (Żuławy Wielkie), jako słone wody młodoreliktowe. Istotną rolę w tym przypadku odgrywają serie osadów słaboprzepuszczalnych, bogatych w substancje organiczne i minerały ilaste.

Klasycznym rozróżnieniem warunków występowania wód na potrzeby modelowania mogą być typy wód według Pazdry (1977):

- wody przypowierzchniowe,
- wody gruntowe,
- wody wgłębne,
- wody głębinowe, uznawane za stagnujące.

Na terenie Polski Pazdro (1977) wyróżnił 14 typów struktur hydrogeologicznych, rozumianych jako zbiorowiska wód podziemnych, występujących w określonym układzie warstw skalnych. W zdecydowanej większości nie pokrywają się one z obszarami zlewni hydrogeologicznych, które mogą być przyjmowane jako obszary bilansowe wód podziemnych. Struktury geologiczne nie mogą być utożsamiane ze strukturami hydrogeologicznymi, gdyż ich zasięg wynika z dynamiki wód podziemnych i układu ich krążenia. Małe zlewnie hydrogeologiczne, zwłaszcza na obszarach wyżyn i gór, mają również inny zasięg, niż zlewnie hydrologiczne wyznaczone na podstawie kryterium geomorfologicznego i spływu wód powierzchniowych. Można przyjąć założenie, że im większa jest zlewnia rzeki, tym bardziej jej obszar jest zbliżony do obszaru zlewni hydrogeologicznej. Pojęcie zlewni hydrogeologicznej jest bardzo bliskie jednolitej części wód podziemnych. Było to jednym z powodów agregacji (połączenia) zlewni rzek i zlewni hydrogeologicznych w obrębie jednej JCWPd (Nowicki, Olędzka, red., 2009).

Według Szymanki (1980) interesującą koncepcję hydrogeologicznego modelu pojęciowego przedstawił Gołąb (1959, 1964), według której „wody podziemne stanowią medium w pewnym sensie odrębne, «włożone» w środowisko skalne, ściśle jednak z nim powiązane związkami

hydraulicznymi”. Gołąb jako podstawę systematyki stosował pojęcie jednostki hydrogeologicznej w ogólnej definicji rozumianej jako „zespół procesów i faktów hydrogeologicznych różnego rzędu, powiązanych ze sobą i uwzględniających formy i charakter warstw wodonośnych”. W bardziej szczegółowym ujęciu jest to „forma środowiska skalnego, w którą jest «włożona» bryła wodna, czyli układ strumieni, rozdzielona na: obszar zasilania, drogi krążenia wód i obszar zbiorczy”. W takim modelu pojęciowym „warstwa wodna i poziom wodny (jako bryły wodne – przyp. autora) są pojęciami nie pokrywającymi się z pojęciami warstwa wodonośna i poziom wodonośny i oznaczają formę organizacji samego zbiorowiska wód”. Z powyższego wynika, że zaproponowane przez Gołąba pojęcie bryły wodnej jest w dużym stopniu zgodne z pojęciem groundwater body (JCWPd), zdefiniowanym w RDW.

W publikacjach z zakresu hydrodynamiki wód podziemnych i w kartografii hydrogeologicznej (Bear, 1972; Szymanko, 1980 i inni) został wprowadzony termin jednostki hydrogeologicznej, definiowanej jako forma przestrzeni ośrodka skalnego zajmowana przez strumień wód podziemnych podczas ich przepływu od strefy zasilania do strefy drenażu włącznie. Termin jednostka hydrogeologiczna ma szereg znaczeń, z których najbardziej aktualny jest zapewne zdefiniowany w języku angielskim, np. w hydrogeologicznym modelu INSPIRE „Hydrogeologic Unit”, to: „Means any soil of rock unit or zone which by virtue of its porosity or permeability, or lack thereof, has a distinct influence on the storage or movement of groundwater. (EPA) Any soil or rock unit or zone that because of its hydraulic properties has a distinct influence on the storage or movement of groundwater.” <http://water.nv.gov/WaterPlanning/dict-1/PDFs/wwords-h.pdf>. Tak rozumiana jednostka może być utożsamiana z prostym schematem modelu hydrogeologicznego. W zlewni hydrogeologicznej można wyróżnić szereg jednostek, czyli strumieni wód podziemnych. Stąd model zlewni będzie systemem składającym się z wielu strumieni, dla których w zamkniętej przestrzeni ośrodka skalnego obowiązuje zasada ciągłości i zachowania masy i dla których można wyznaczyć bilans wód. Przyjmując do analizy zlewni hydrogeologicznej schematy krążenia wód, można wprowadzić hierarchię jednostek hydrogeologicznych zgodnie z ich pionowym zasięgiem i rozciągłością w planie. Jednostkami podstawowymi będą strumienie o zasięgu regionalnym, natomiast w ich obszarach występują strumienie przejściowe i lokalne (*intermediate and local flow systems*).

Szymanko (1980) wprowadził do polskiej hydrogeologii pojęcie systemu wodonośnego szczególnie na potrzeby modelowania przepływu wód. Jest on definiowany jako możliwy do wyodrębnienia układ strumieni wód podziemnych w określonym ośrodku skalnym. System wodonośny ma określone hydrauliczne granice naturalne, określoną strukturę (typ systemu) oraz sposób kontaktu z powierzchnią terenu. System wodonośny może być definiowany jako konstrukcja badawcza – wyidealizowany obiekt naturalny, będący zbiorem oddziałujących na siebie elementów. Związek elementów systemu zapewnia im określone relacje i sprzężenia, które decydują o transformacji sygnału na wejściu (stany wejściowe) i sygnału na wyjściu, który wskazuje na oddziaływanie systemu. Modelem numerycznym w hydrogeologii jest zatem model systemu rozumiany jako abstrakcja matematyczna ograniczona warunkami granicznymi w przestrzeni i w czasie, która odwzorowuje system naturalny i jego zachowanie (Szymanko, 1980). Schematy stosowanych w praktyce hydrogeologicznej modeli systemów wodonośnych przedstawiono na figurze 5.1.

W praktycznych zadaniach dotyczących modelowania systemów wodonośnych pomijana jest zwykle strefa aeracji, a wymiana wody ze strefą saturacji jest realizowana przez skorygowane wielkości funkcji źródła. Korekty te są wprowadzane na podstawie znajomości elementów bilansu wodnego zlewni lub wybranego obszaru.

W modelach deterministycznych, składających się z elementów o parametrach określonych w węzłach lub blokach siatki obliczeniowej, sygnał wejściowy zadany na linii lub powierzchni

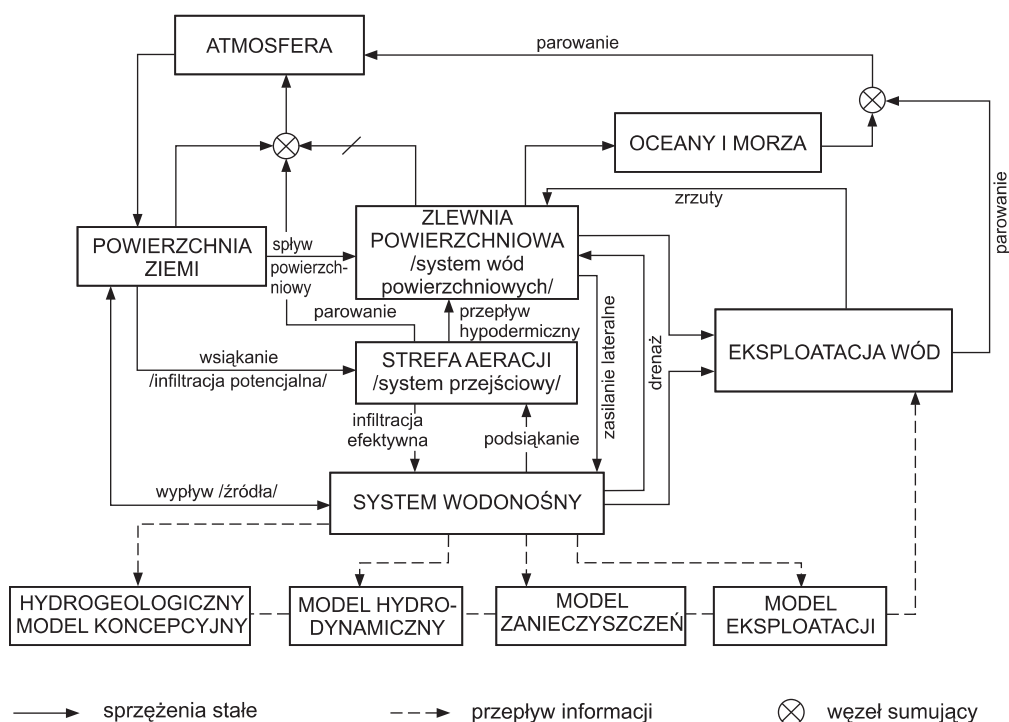


Fig. 5.1. Schemat sprzężeń systemów wodonośnych w modelach hydrogeologicznych (Szymanko, 1980)

brzegowej z otoczeniem, jest przekazywany kolejnym elementom, podlegając transformacji. Sygnałem na wyjściu z modelu może być zmiana stanu (wysokości hydraulicznej, ciśnienia piezometrycznego lub przepływu) w zależności od parametrów ośrodka hydrogeologicznego i wywołanych zmian wewnątrz systemu (np. ujęcia wód, drenaże budowlane, odwodnienia wykopów, odkrywek, zmiany zasilania).

W nawiązaniu do klasyfikacji dokonanej przez Szymanko (1980), można wyróżnić następujące typy struktur wodonośnych w odniesieniu do schematów hydrogeologicznych stosowanych w modelowaniu:

- doliny rzeczne i pradoliny, powszechne w warstwach czwartorzędu na Niżu Polskim;
- doliny kopalne, często połączone z wodonośnymi warstwami międzymorenowymi;
- obszary zlewni i międzorzeczy, najczęściej systemy wielowarstwowe, będące w więzi hydraulicznej;
- wysoczyzny morenowe o wielowarstwowym systemie wodonośnym;
- niecki i subniecki hydrogeologiczne obejmujące kenozoiczne i mezozoiczne warstwy wodonośne;
- struktury szczelinowe, szczelinowo-porowe i szczelinowo-krasowe w obszarach o dużych deniwelacjach (góry, pogórza i odcinki przełomowe wyżyn).

Wymienione powyżej typy schematów hydrogeologicznych odnoszą się do modeli regionalnych, a obszar modelowania przepływu obejmuje nawet tysiące kilometrów kwadratowych. Odmiennie konstruowane są modele ujęć, odwodnień odkrywek lub wykopów budowlanych ze względu na skalę i ograniczony obszar. Obszar tych modeli jest zwykle fragmentem systemu wodonośnego o uproszczonym opisie warunków hydrogeologicznych. W zadaniach uproszczonych często są stosowane założenia jednorodnych i izotropowych warstw wodonośnych, natomiast warunki brzegowe są odnoszone do stałych wysokości hydraulicznych, linii prądu lub granic warstw wodonośnych. Wyniki modelowania w tych przypadkach trudno jest zweryfikować na podstawie wyników bilansów hydrogeologicznych.

Wyznaczanie granic jednostek hydrogeologicznych nie jest zadaniem łatwym. Pojęcie jednostki hydrogeologicznej, podobnie jak w Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., red., 2002), rozumie się tu szeroko. Może to być przestrzeń, a w planie – obszar odpowiadający tej przestrzeni, w której znajduje się rozpatrywana JCWPd. Może to być także główny zbiornik wód podziemnych lub jakiś inny system hydrogeologiczny, dla którego opracowuje się model przepływu wód podziemnych. Dla każdej z tych kategorii zasady wyznaczania granic są inne:

1. Zasady wyznaczania granic dla modelu wynikają z fizyczno-matematycznych podstaw takiego modelu. Jednak generalną zasadą w tym przypadku jest takie ustalanie granic modelu, aby miał on jak najwięcej warunków brzegowych I rodzaju (Dirichleta) lub III rodzaju (Robina) zbliżonych do I rodzaju (fig. 5.2). Model wyłącznie z warunkami brzegowymi II rodzaju (Neumanna) jest modelem całkowicie błędnym. Z tego względu najczęściej granicami poprawnego modelu są znaczące w rozpatrywanym obszarze wody powierzchniowe, a jego komponentami przestrzennymi są tzw. międzyczecza – obszary położone pomiędzy dwoma rzekami.
2. Główne zbiorniki wód podziemnych, i nie tylko główne, z samej definicji są wyodrębniane na podstawie przestrzennej zmienności parametrów decydujących o dobrym przepływie wody. Z tego względu można je traktować jako wyodrębnione systemy wodonośne i granicami ich są strefy o wyraźnie słabszej więzi hydrodynamicznej, niż ich wnętrze.

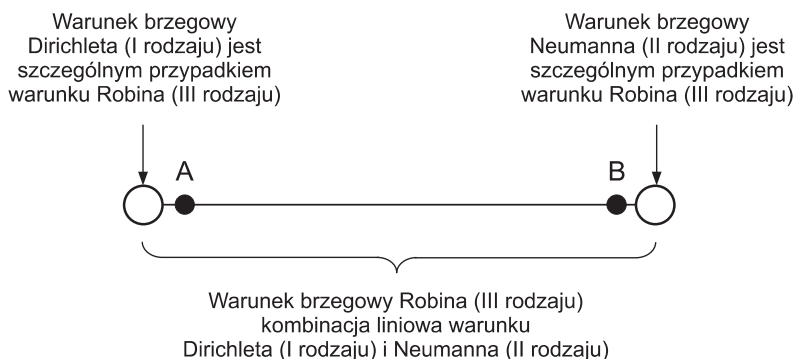


Fig. 5.2. Schematyczne przedstawienie zależności pomiędzy trzema rodzajami warunków brzegowych

W przyrodzie warunki Dirichleta (I rodzaju) i Neumanna (II rodzaju) praktycznie nigdy nie występują – jest to matematyczna idealizacja. Gdy warunek III rodzaju (Robina) jest bardzo zbliżony do warunku I rodzaju (A), to dla uproszczenia można go nim zastąpić. Zasadę tę stosuje się także w przypadku warunku II rodzaju (B)

3. Jednolite części wód podziemnych, jako woda wypełniająca fragment przestrzeni hydrogeologicznej na określonym obszarze, różni się od obu przedstawionych powyżej kategorii jednostek hydrogeologicznych. Kategoria ta ma znaczenie głównie przy określaniu stanu ilościowego i jakościowego wód podziemnych, a potrzeba ich wyodrębnienia jest podyktowana wymogami RDW. Z tego względu ustalanie granic tych jednostek jest oparte na zupełnie innych zasadach.
4. Obszar bilansowy jest pojęciem administracyjno-gospodarczym, ponieważ jest to dowolna jednostka hydrogeologiczna lub jej część, wydzielona dla ustalenia zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych oraz oceny stopnia ich zagospodarowania. Z tego względu nie ma wyraźnie określonych zasad wyznaczania granic obszaru bilansowego i zależy to od rodzaju jednostki hydrogeologicznej, jakiej ten obszar ma dotyczyć.
5. Podział zlewniowy, oparty na wododziałach wód podziemnych, jest często stosowany w analizach dotyczących zagadnień zasobowych i bilansowych. Jego niewątpliwą zaletą jest możliwość wyznaczenia odpływu podziemnego jako elementu bilansu zlewni. Ostatnio obserwuje się tendencję do budowania modeli przepływu wód podziemnych dla zlewni, co nie jest metodycznie poprawne. Przyczyną tego jest fakt, że wododział podziemny nie jest czynnikiem kształtującym stan systemu (nie jest przyczyną), lecz jest wynikiem jego stanu (jest skutkiem działania innych czynników) i przez to jest zmienny w czasie, szczególnie, gdy w rozpatrywanym obszarze obserwuje się intensywne zmiany wywołane znaczącym poborem wody.

Pojęcie jednostki hydrostratygraficznej w Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., red., 2002) nie jest zdefiniowane jednoznacznie i występuje w definicjach innych pojęć tego słownika, np. piętro wodonośne. Jednostka hydrostratygraficzna jest tam związana z wiekiem utworów wodonośnych, np. piętro wodonośne triasu. Pojęcie to, określane akronimem HSU (*HydroStratigraphic Unit*), jest jednak bardzo często stosowane w światowej literaturze hydrogeologicznej. Stanowi ono także jeden z głównych elementów modeli pojęciowych dotyczących wód podziemnych, których przykładami są model INSPIRE (fig. 2.6) i model GWML (fig. 2.8). Jako pierwszy termin ten wprowadził Maxey (1964), definiując go jako „przestrzeń skalną (fragment litosfery – przyp. autora) o wyraźnie poziomym rozprzestrzenieniu, która tworzy geologiczne środowisko dla określonego systemu wód”. Wyodrębnienie tej przestrzeni z otoczenia jest oparte nie tylko na charakterystyce litologicznej, ale także na zmienności parametrów „które mają zastosowanie w szczególności do przepływu wody, jej występowania i magazynowania”. Z tego wynika, że pojęcie to rozumiane w takim sensie nie jest związane z pojęciem jednostka stratygraficzna stosowanym w geologii, gdzie podstawą jest wiek zdefiniowany w tablicy stratygraficznej.

5.1. Przestrzenny model budowy geologicznej JCWPd

Metodyka opracowania przestrzennego modelu budowy jednostki hydrogeologicznej zajmuje dużo miejsca w literaturze. Jednym z przykładów takich prac jest propozycja metody wydzielania jednostek hydrostratygraficznych w heterogenicznych środowiskach utworów aluwialnych (Noyes i in., 2000). W dużym uproszczeniu można ją ująć następującym algorytmem:

1. Wybór i pozyskanie niezbędnych zbiorów danych – zwłaszcza profili otworów wiertniczych, ocena jakości zawartych w nich danych i opracowanie siatki dla przekrojów.
2. Określenie granic przestrzennych, w tym stropu i spągu, jednostki hydrostratygraficznej na podstawie danych z otworów wiertniczych dla obszaru wykraczającego poza hipotetyczny jej zasięg. Miejsca o dużej gęstości i jakości danych należy poddać analizie w pierwszej kolejno-

ści, ponieważ będą stanowiły repery, do których będzie można odnosić interpretację dla obszarów słabiej rozpoznanych. W miarę możliwości interpretacja przestrzenna w miejscach reperowych powinna być oparta także na wynikach próbnych pompowań i profilach litologicznych skorelowanych z badaniami geofizycznymi.

3. Korelacja granic (stropowych i spągowych) na analizowanym obszarze przy użyciu siatki dla przekrojów. Siatka jest przeznaczona do powiązania profili wszystkich wierceń na rozpatrywanym obszarze. Szczególnie istotne w tym przypadku jest określenie więzi hydraulicznej pomiędzy poszczególnymi fragmentami profili, zarówno poziomych, jak i pionowych. Gdy siatka jest dostatecznie gęsta i rozległa, przeprowadzenie poprawnej interpretacji trójwymiarowej nie powinno być trudne.
4. Analiza i eliminacja niezgodności w korelacji granic jednostki hydrostratygraficznej, jakie wystąpiły na siatce przekrojów. W wielu przypadkach bardzo trudno wyodrębnić poszczególne jednostki hydrostratygraficzne, wykorzystując jedynie dane opisujące stan naturalny, bez analizy wyników próbnych pompowań. W takich przypadkach należy w maksymalnym stopniu wykorzystać dane geofizyczne.
5. Opracowanie map określających przestrzenne położenie powierzchni granicznych: stropowej i spągowej, a także map miąższości, hydroizohips i przewodności dla poszczególnych wyodrębnionych jednostek hydrostratygraficznych.
6. Analiza opracowanych map dla określenia anomalii i niezgodności w korelacjach punktów profili. Na podstawie map przygotowanych w poprzednim etapie analizy można wskazać miejsca, w których występują anomalie lub niezgodności pomiędzy poszczególnymi elementami geometrii badanego środowiska, a także pomiędzy geometrią a pozostałymi atrybutami – parametrami hydrodynamicznymi lub poziomym i pionowym rozkładem wysokości (potencjałów) hydraulicznych. Należy w takim przypadku ustalić przyczyny tych niezgodności i anomalii, ponieważ mogą to być niepoprawne założenia lub błędne interpretacje dokonane w poprzednich krokach analizy.
7. W przypadku zbyt wielu anomalii i niezgodności, po ustaleniu przyczyn, procedurę trzeba powtórzyć eliminując te dane, które prawdopodobnie są błędne. Ten proces powinien być powtarzany iteracyjnie do momentu rozwiązania wszystkich niezgodności.

Trzeba jednak zaznaczyć, że metodyka ta została opracowana dla analizy lokalnej w niewielkich systemach hydrogeologicznych. Dla zastosowań regionalnych, do jakich zalicza się warunki hydrogeologiczne JCWPd, potrzebne są istotne jej modyfikacje.

5.1.1. Metody opracowania schematu warunków hydrogeologicznych przy pomocy dedykowanego oprogramowania

Specyfikacja warunków hydrogeologicznych zapisana w formie danych cyfrowych często jest przedstawiana na ekranie komputera w postaci trójwymiarowego obrazu graficznego, będącego wizualizacją tych danych. Z punktu widzenia użytkownika takiego oprogramowania można przyjąć, że właśnie ten obraz jest formą opisu warunków hydrogeologicznych. Taka forma graficzna może być również określona jako model tych warunków, jednak nie nadający się do przetwarzania pod względem informatycznym. Z tego względu, gdy mamy do czynienia z graficznym obrazem danych, można używać sformułowania „model warunków hydrogeologicznych” i w tym rozdziale to określenie jest stosowane.

W hydrogeologii model warunków hydrogeologicznych to trójwymiarowy szkic graficzny, przedstawiający ogólny schemat warunków hydrogeologicznych w obrębie i na granicach hydrostruktury wraz z syntetycznym opisem, zawierającym najważniejsze parametry hydrogeologiczne. Model warunków dowolnego obiektu hydrogeologicznego (np. zbiornika wód podziemnych, JCWPd itp.) powinien zawierać następujące elementy:

1. Usytuowanie obiektu w przestrzeni geologicznej oraz zdefiniowanie i opis wszystkich powierzchni granicznych, w tym:
 - Przebieg granic pionowych obiektu. W modelowaniu hydrogeologicznym jako najbardziej poprawne traktuje się modele, w których granice pionowe stanowią ciekły powierzchniowe, jednakże w bardzo wielu przypadkach zalecenie to nie może być zastosowane. Dotyczy to m.in. modelowania jednolitych części wód podziemnych wydzielonych dla obszaru Polski, ponieważ w zdecydowanej większości przypadków ich granice są oparte na wododziałach (podział zlewniowy) lub zasięgu hydrostruktur (fig. 5.3), a jedynie sporadycznie na rzekach.
 - Obraz cyfrowy morfologii powierzchni terenu wraz z siecią hydrograficzną (fig. 5.4). Obecnie jest to prosty zabieg, bowiem cyfrowe odwzorowania terenu, jak również sieć hydrograficzna w wersji cyfrowej, są już łatwo dostępne.
 - Zasięg głębokościowy przestrzeni geologicznej, będącej przedmiotem modelowania. W przypadku JCWPd, które z założenia dotyczą wód nadających się do picia, dolna granica modelu jest związana z głębokością występowania wód słodkich. Na obszarze Polski parametr ten jest bardzo zróżnicowany – np. na Kujawach wynosi 0, a na wschód od Warszawy ponad 1000 m. Model warunków hydrogeologicznych powinien być zatem tak skonstruowany, aby po przejściu do modelu matematycznego umożliwiał przeprowadzenie symulacji określającej warunki, przy których dochodzi do istotnego przepływu wód słonych do warstw zawierających wody słodkie (np. w wyniku nadmiernej eksploatacji).

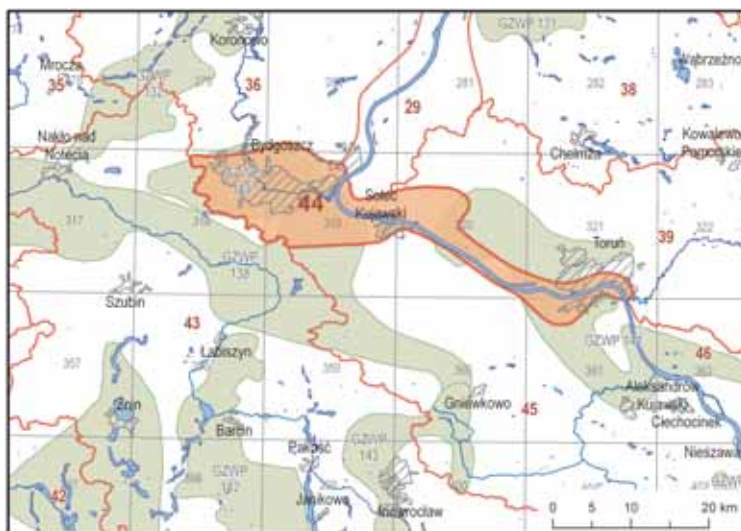


Fig. 5.3. Lokalizacja JCWPd nr 44 (przykład wydzielenia hydrostrukturalnego)

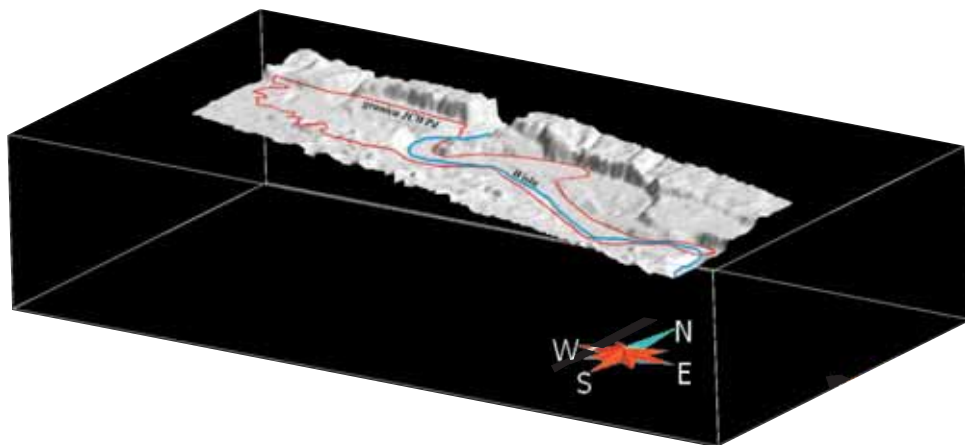


Fig. 5.4. Morfologia terenu i granice JCWPd nr 44 w modelu warunków hydrogeologicznych

2. Opis przestrzeni wewnętrznej w obrębie granic pionowych i w ich pobliżu.

Opis ten w praktyce hydrogeologicznej sprowadza się do wyznaczenia w modelowanej przestrzeni położenia poziomów wodonośnych oraz warstw słaboprzepuszczalnych. Najczęściej wykonuje się to na podstawie syntetycznych przekrojów, będących wynikiem schematyzacji warunków hydrogeologicznych (fig. 5.5) usytuowanych w przestrzeni wirtualnej modelu (fig. 5.6).

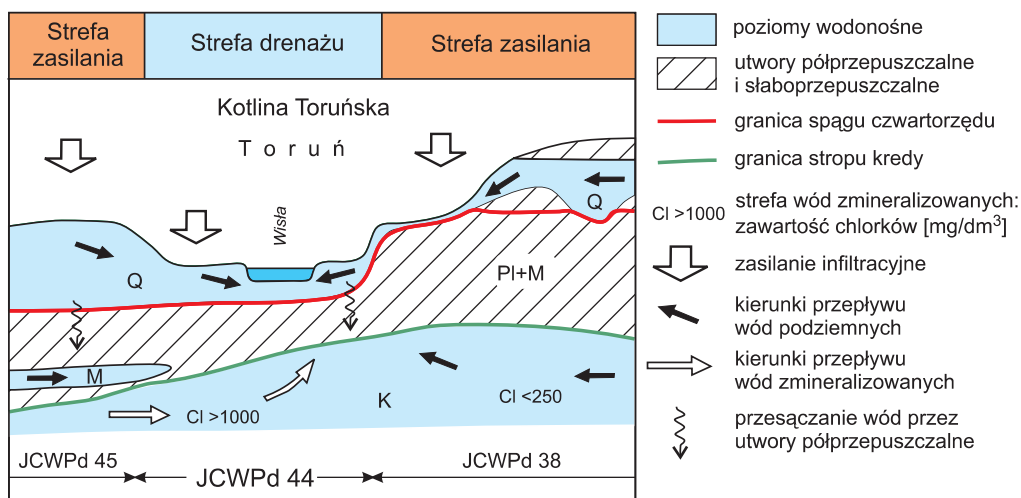


Fig. 5.5. Schemat przepływu wód podziemnych w obrębie JCWPd nr 44 (model warunków hydrogeologicznych 2D)

Stratygrafia utworów: Q – czwartorzęd, Pl – pliocen, M – miocen, K – kreda

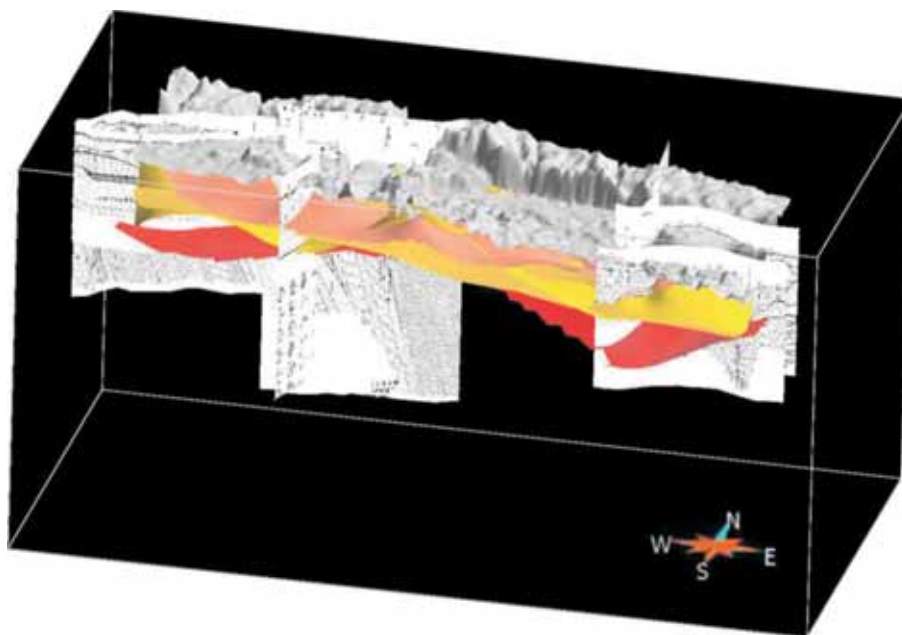


Fig. 5.6. Budowa modelu warunków hydrogeologicznych JCWPd nr 44 na podstawie pionowych schematów przepływu (zsyntetyzowanych przekrojów hydrogeologicznych)

Wprowadzenie danych dotyczących granic struktur wewnętrznych wyznaczonych na schematach 2D i ich weryfikacja pozwala na wyznaczenie powierzchni granicznych typu spąg warstwy wodonośnej/strop warstwy nieprzepuszczalnej oraz spąg warstwy nieprzepuszczalnej/strop kolejnej warstwy wodonośnej itd. (fig. 5.7, 5.8).

Warto w tym miejscu zaznaczyć, że schematyzacja warunków hydrogeologicznych to w zasadzie najważniejsze zadanie w procesie budowy modelu. Należy do grupy prac interpretacyjnych, a więc założenia efekt tego zadania jest wynikiem doświadczeń i poziomu warsztatu zawodowego autora, zatem w znacznej mierze jest subiektywny.

3. Opis ruchu wód podziemnych w obrębie i na granicach JCWPd.

Ruch wód podziemnych w obrębie przestrzeni geologicznej wynika z rozkładu ciśnień, zatem podstawowym zadaniem na tym etapie jest wprowadzenie do modelu powierzchni ciśnień piezometrycznych modelowanej warstwy wodonośnej. Pozwala ona na wyznaczenie m.in. kierunków przepływu wód podziemnych, jak również określenie stref zasilania i drenażu oraz rodzaju zasilania.

4. Związki systemów wewnętrznych z otaczającą przestrzenią geologiczną.

Wydzielona jako obiekt modelowania część przestrzeni geologicznej pozostaje w związkach z otoczeniem, które są istotne lub do pominięcia z punktu widzenia zamierzonego celu modelo-

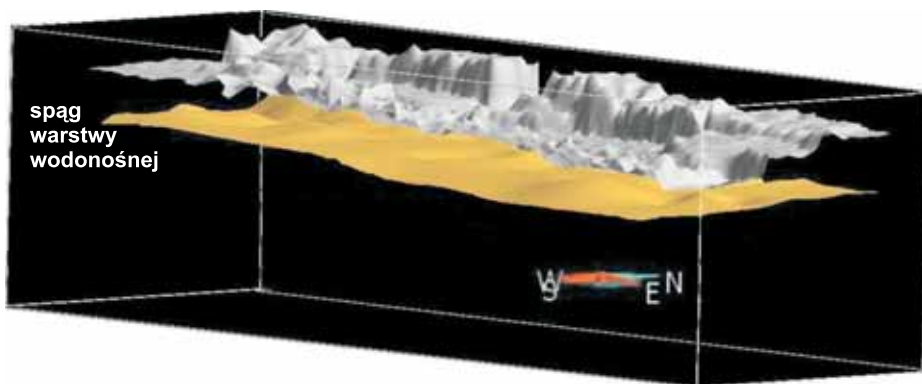


Fig. 5.7. Model warunków hydrogeologicznych z wprowadzonym spągiem warstwy wodonośnej



Fig. 5.8. Model warunków hydrogeologicznych z wprowadzonym spągiem warstwy wodonośnej i spągiem utworów nieprzepuszczalnych

wania. W przypadku badań hydrogeologicznych związki te mogą mieć charakter statyczny (np. ciągłość niektórych warstw poza granice modelu) lub dynamiczny, np. przepływy poziome wód na granicach pionowych obszaru modelowania lub przepływy pionowe w stropie i spągu warstwy. W części opisowej do modelu warunków hydrogeologicznych powinny być one wymienione wraz z oceną ich wpływu na wynik modelowania.

5.2. Generalizacja elementów modelu przestrzennego

Model jest zawsze uproszczeniem rzeczywistości – dotyczy to także modelu budowy przestrzennej jednostki hydrogeologicznej. Podstawą opracowania modelu jest przestrzenne wyodrębnienie elementów składowych systemu, dla którego jest on budowany. Elementami takimi mogą być systemy składowe, gdy system jest skomplikowany i jednostki hydrostratygraficzne (*hydrostratigraphic units*), do których zalicza się poziomy wodonośne (*water-bearing horizons*),

warstwy wodonośne (*aquifers*), najczęściej w utworach warstwowych i w innych formach środowiska występowania wód podziemnych, np. strefy spękań tektonicznych w skałach litych oraz w systemach krasowych.

Dla tak wyodrębnionych elementów określa się ich zasięg przestrzenny i w dalszej kolejności granice. Stosując w tym przypadku terminologię geomatyki, wyodrębnione elementy są wyróżnieniami geoprzestrzennymi. Możemy mieć do czynienia z wyróżnieniami wyraźnie określonymi o dostatecznie znanych granicach, wyróżnieniami hipotetycznymi z powodu niedostatku danych bądź wyróżnieniami o granicach hipotetycznych lub rozmytych. Wyróżnienia rozmyte są konsekwencją niedostatku danych lub z samej natury przyrodniczej takiego wyróżnienia. Na dokładniejsze przedstawienie zasługują dwie kategorie wyróżnień, często spotykane w geoprzestrzennej informacji hydrogeologicznej – wyróżnienia rozmyte i wyróżnienia ustanowione (Michalak, 2003a). Pozostałe kategorie są typowe i występują w wielu innych dziedzinach.

5.2.1. Hydrogeologiczne wyróżnienia rozmyte

Większość wyróżnień, z jakimi mamy do czynienia w hydrogeologii, to wyróżnienia rozmyte (*fuzzy features*). W przypadku hydrogeologii rozmycie (*fuzziness*) może dotyczyć granic przestrzennych i czasowych, a także charakterystycznych dla określonego wyróżnienia cech niegeoprzestrzennych.

Obok rozmycia, które można by nazwać naturalnym lub rzeczywistym (*genuine*), w hydrogeologii, podobnie jak ogólnie w geologii, mamy często do czynienia z rozmyciem pozornym lub formalnym (*formal fuzziness*), wynikającym z braku dostatecznie dokładnej informacji. Jest to spowodowane trudnym dostępem do wyróżnienia i przez to do informacji o tym wyróżnieniu. Można to wykazać przy pomocy przykładów:

1. Jezioro najczęściej nie jest wyróżnieniem rozmytym, ponieważ ma na ogół wyraźne, ostre, dostępne i przez to łatwe do wyznaczenia granice.
2. Podmokłość jest wyróżnieniem łatwo dostępnym, ale jego granice są trudne do wyznaczenia. Przejście od obszaru podtopionego do miejsca suchego jest często stopniowe i wyznaczenie granic nie jest jednoznaczne – często wiemy jedynie, gdzie z pewnością jest podmokłość, a gdzie suchy grunt. Można powiedzieć, że jest to wyróżnienie naturalnie rozmyte.
3. Znajdująca się głęboko pod powierzchnią terenu kopalna rafa koralowa ma ostre granice geoprzestrzenne, ale dostęp do tego wyróżnienia i do informacji o przebiegu jego granic jest bardzo ograniczony. Często potrafimy powiedzieć jedynie, że w pewnym miejscu jest to rafa, a w innym już jej nie ma. Prawdopodobieństwo istnienia rafy w punktach leżących na linii łączącej te dwa miejsca jest funkcją liniową ciągłą i możemy na tej podstawie powiedzieć, że nasza wiedza o położeniu granicy jest rozmyta. Jest to podobna sytuacja, jak w przypadku naturalnej granicy rozmytej, lecz przyczyna leży w trudnym dostępie do informacji o położeniu granicy, która nie jest rozmyta, ale nie jest bezpośrednio dostępna do obserwacji. Można to uznać za przypadek rozmycia pozornego.
4. W hydrogeologii często mamy do czynienia z jednoczesnym rozmyciem naturalnym i pozornym. Przykładem może być głęboko położona warstwa wodonośna i w takim przypadku bardzo często poziomy zasięg tej warstwy jest rozmyty jednocześnie naturalnie i pozornie. Naturalnie, gdy warstwa może się skończyć w pewnym miejscu z powodu stopniowych zmian litologicznych, a pozornie, gdy nie mamy bezpośredniego dostępu do miejsca, gdzie te zmiany występują.

5.2.2. Hydrogeologiczne wyróżnienia ustanowione

Ustanowienie, podobnie jak rozmycie, może odnosić się do granic przestrzennych i czasowych, a także charakterystycznych dla określonego wyróżnienia cech niegeoprzestrzennych. Jako ustanowienie w tym przypadku rozumie się arbitralne określenie czegoś, co nie istnieje obiektywnie w rzeczywistości, ale bez tego coś, co istnieje realnie, nie może być poprawnie zdefiniowane lub sklasyfikowane. Ustanowienie często dotyczy relacji pomiędzy wyróżnieniem geoprzestrzennym a czymś innym, np. obiektem niegeoprzestrzennym. Granicą ustanowioną jest np. horyzont, granica jednostki administracyjnej lub granica działki geodezyjnej. Dobrym przykładem granicy ustanowionej jest zatoka morska. Od strony lądu jest ona ograniczona naturalną ostrą granicą – linią brzegową, lecz od strony morza otwartego nie ma granicy naturalnej. Z tego względu ustala się jakąś arbitralną linię, która oddziela zatokę od otwartego morza. Linia ta jest właśnie granicą ustanowioną.

W hydrogeologii, podobnie jak ogólnie w geologii, większość granic przestrzennych ma charakter ustanowiony i jest to spowodowane albo rzeczywistym rozmyciem tych granic, albo brakiem informacji o ich dokładnym położeniu (rozmycie pozorne) lub też koniecznością wydzielenia nie do końca określonej części z jakiejś całości. Sposób określania takich granic zależy w głównej mierze od typu wyróżnienia i wiedzy, jaką się dysponuje na temat tego wyróżnienia. Do najczęściej spotykanych hydrogeologicznych wyróżnień ustanowionych należą m.in. podtypy wyprowadzone z typu bazowego „obszar <x> wód podziemnych”, np. „obszar <deficytu> wód podziemnych”, „obszar <ochrony> wód podziemnych”, „obszar <zasobowy> wód podziemnych” i inne. Do tej grupy należą także wszystkie podtypy wyprowadzone z typu bazowego „strefa”, np. „strefa wpływu ujęcia wód podziemnych”, „leż depresji”, „złożę wód podziemnych”, „region hydrogeologiczny” i „prowincja hydrogeologiczna”.

Jednym z najważniejszych aspektów opracowania schematu warunków hydrogeologicznych jest pominięcie nieistotnych szczegółów. Obowiązują tu podobne zasady, jak przy opracowaniu modelu przepływu wód podziemnych. Nieistotne są te wszystkie czynniki, które nie wpływają znacząco na stan systemu hydrogeologicznego, w którym znajduje się rozpatrywana JCWPd. Brak znaczącego wpływu może być spowodowany różnymi przyczynami:

1. Czynniki jest zbyt słaby lub zbyt mały w porównaniu z innymi czynnikami. Przykładem mogą być drobne przewarstwienia słaboprzepuszczalne w serii utworów piaszczystych, które są najczęściej pomijane. Innym przykładem jest wpływ pojemności sprężystej na inercję systemu hydrogeologicznego, czyli na szybkość reagowania na zmiany warunków brzegowych. W warunkach naporowych (zwierciadła napiętego) jest to główny czynnik pojemnościowy decydujący o inercji. W warunkach zwierciadła swobodnego można go pominąć, ponieważ głównym czynnikiem, o wiele silniejszym, jest zjawisko odsączalności, a ściślej – cały zespół zjawisk zachodzących w strefie ciśnień ujemnych (w strefie aeracji).
2. Czynniki jest zbyt odległy i jego wpływ nie sięga do rozpatrywanego obszaru, inne bliższe czynniki go zasłaniają. Jeżeli np. pracująca studnia jest oddzielona od rozpatrywanego miejsca rzeką, to wpływ tego ujęcia można w większości przypadków pominąć, ponieważ jego oddziaływanie jest ograniczone przez tę rzekę – zasłania ona to ujęcie. Gdyby rzeki nie było, wpływ ujęcia mógłby być znaczący.
3. Nie ma bezpośredniego wyraźnego związku „przyczyna–skutek” pomiędzy czynnikiem a analizowanymi zjawiskami. Na przykład wpływ krótkookresowych zmian pogodowych na stan głębokich systemów może być pominięty, ponieważ zasilanie tych systemów odbywa się za pośrednictwem innych płytszych systemów, pełniących w tym przypadku rolę buforową.

4. Dwa czynniki o przeciwnym działaniu znoszą się. Na przykład na obszarach suchych roczne parowanie terenowe (ewapotranspiracja całkowita) może być równe rocznej wielkości opadów i w konsekwencji zasilanie infiltracyjne może być bliskie zeru.

Przedstawione powyżej przykłady nie wyczerpują całej listy przypadków, w których czynniki kształtujące warunki hydrogeologiczne mogą być pominięte. W konkretnych sytuacjach praktycznych decyzja o pominięciu jakiegoś faktu jest trudna i wymaga od hydrogeologa dużego doświadczenia zawodowego. Gdy dotyczy to problematyki z zakresu przepływu wód, cennym narzędziem pozwalającym ocenić stopień oddziaływania określonego czynnika jest model numeryczny. Zmieniając w modelu wielkość wybranego czynnika, np. o $\pm 10\%$, można określić jego znaczenie na podstawie reakcji modelu na takie zmiany.

Z zagadnieniem generalizacji w przypadku danych geoprzestrzennych mamy najczęściej do czynienia, gdy trzeba przejść z poziomu o dużej szczegółowości i dokładności do poziomu bardziej ogólnego, o mniejszej szczegółowości i dokładności. Typowym przykładem generalizacji, jednak różniącym się wyraźnie od uproszczeń schematu warunków hydrogeologicznych, jest generalizacja kartograficzna. Zazwyczaj ma to miejsce, gdy na podstawie mapy o dużej skali opracowuje się mapę o skali mniejszej. Generalizacja może obejmować formę i treść mapy. W przypadku formy najczęściej upraszcza się kształty elementów mapy, a w treści elementy mniej znaczące są pomijane. W obu przypadkach jest to generalizacja ilościowa i dotyczy głównie geometrii elementów mapy. Generalizacja jakościowa to najczęściej uproszczenie legendy mapy i w konsekwencji – uproszczenie treści mapy.

Analogicznie, w przypadku schematu warunków hydrogeologicznych można przyjąć, że generalizacja ilościowa to:

1. Uproszczenie linii konturowych ograniczających wyróżnienia hydrogeologiczne. Może to dotyczyć np. zasięgu poziomu wodonośnego lub powierzchni stropowej i spągowej.
2. Pominięcie małych wyróżnień, np. soczewkowatych przewarstwień, rozmytych wyróżnień o nieco innych parametrach hydrodynamicznych, a także małych ujęć wody podziemnej, w których pobór wody może być pominięty w bilansie wodnym jednostki hydrogeologicznej.

Generalizacją jakościową będzie agregowanie (grupowanie) różnych wyróżnień o bardzo podobnych właściwościach hydrogeologicznych, np.:

- połączenie dwóch warstw o różnej genezie i litologii, ale o podobnych parametrach hydrodynamicznych, w jeden poziom wodonośny;
- traktowanie ujęcia złożonego z kilku studni jako jedno miejsce poboru wody podziemnej;
- zastąpienie zespołu złożonych i wzajemnie powiązanych zjawisk zachodzących ponad zwierciadłem swobodnym prostym współczynnikiem odsączalności.

Oddzielną problematykę stanowi generalizacja przestrzenna przeprowadzana na potrzeby budowy modelu komórkowego (blokowego, siatkowego). Przestrzeń ciągła jest wówczas zastępowana poprzez teselację siecią komórek (bloków) lub/i dyskretyzację skończoną liczbą punktów (węzłów). Takie operacje są konieczne m.in. przy opracowaniu numerycznego modelu przepływu z zastosowaniem metody różnic skończonych. Dotyczy to głównie parametrów ośrodka, warunków brzegowych i wielkości opisujących stan systemu. W operacjach tych parametry lokalnie rozproszone w przestrzeni ciągłej są zastępowane wartościami skupionymi, przypisanymi do komórek lub węzłów. Przykładami takich operacji są:

1. Wyznaczenie punktowych wartości wysokości hydraulicznej, przypisanych węzłom. W poziomym modelu 2D są to wartości średnie z profilu warstwy w tym punkcie.

2. Wyznaczenie sumarycznej wielkości źródeł dodatnich (np. zasilania z infiltracji opadów) i ujemnych (np. poborów wody w ujęciach) dla poszczególnych komórek (bloków) i przypisanie tych wielkości komórkom jako fragmentom przestrzeni.
3. Wyznaczenie więzi hydraulicznej pomiędzy poszczególnymi sąsiadującymi ze sobą komórkami (blokami), wyrażonej przewodnością wodną i przypisanie tych wielkości odcinkom łączącym komórki lub węzły znajdujące się w ich środkach.

Przeprowadzając generalizację warunków brzegowych trzeba przestrzegać następujących zasad:

- do jednego węzła (punktu) może być przypisany tylko jeden warunek I rodzaju (Dirichleta);
- warunki II rodzaju (Neumanna) sumują się w obrębie komórki (bloku) w jeden warunek i w zależności od przyjętej metodyki są przypisane do komórki lub do węzła;
- warunki III rodzaju (Robina) podlegają zasadzie superpozycji – w jednej komórce (lub jednym węźle) może być ich wiele, ale nie jest to prosta suma, jak w przypadku warunku II rodzaju.

Generalizacja struktur siatkowych jest szczególnie ważna i trudna w modelach regionalnych, gdzie moduł dyskretyzacji i teselacji wynosi 0,5 km, a w niektórych przypadkach więcej. W jednej komórce tej wielkości może się znaleźć kilka lub nawet kilkanaście znaczących wyróżnień i wyrażenie tego przy pomocy jednego wyróżnienia lub pojedynczych parametrów nie jest łatwe i może prowadzić do znaczących błędów (Michalak, 2007). Problem ten dotyczy również modeli budowanych dla JCWPd, ponieważ wiele z nich ma wymiary tak duże, że należy zaliczyć je do zagadnień regionalnych.

5.3. Geometria wyróżnień ośrodka wodonośnego

Numeryczny opis przestrzennej budowy jednostki hydrogeologicznej, w której jest zawarta rozpatrywana JCWPd, może być wykonany przy pomocy trzech rozwiązań technologicznych:

1. Najprostszym, stosowanym powszechnie w kartografii (także hydrogeologicznej), jest określenie geometrii w układzie dwuwymiarowym (2D) poziomym w postaci linii granicznej zamkniętej obszar zajmowany przez tę jednostkę. Wymiary pionowe podaje się najczęściej jako wartości średnie, a czasem także maksymalne i minimalne, dotyczące głębokości, miąższości i innych elementów geometrii. Można także posłużyć się podziałem tego obszaru na podobzary, w których wielkości mieszczą się w ustalonych interwałach. Jest to najprostszy sposób określania zmienności przestrzennej, jednak w wielu przypadkach niewystarczający.
2. Całkowicie przeciwnym, złożonym i pełnym opisem, jest pokrycie trójwymiarowe (3D) w formie macierzowej (siatkowej). Przestrzeń zajmowaną przez tę jednostkę hydrogeologiczną dzieli się na równoległościany. Najczęściej jest to siatka sześciątów lub prostopadłościątów o podstawie kwadratowej i znacznie mniejszej wysokości, które traktowane jako komórki (bloki), mogą mieć przypisane różne atrybuty. W tym przypadku atrybutem jest przynależność do określonych wcześniej jednostek hydrostratygraficznych lub innych wyróżnień hydrogeologicznych. W takim ujęciu geomatyczną formą danych jest pokrycie 3D. Opisem przestrzennym wybranego wyróżnienia jest tu zbiór komórek, które mają taki sam atrybut przynależności do wyróżnienia i przez to określają przestrzenny zasięg tego wyróżnienia. Taka forma opisu jest zalecana wówczas, gdy dane mają być użyte do analizy trójwymiaro-

wej, a szczególnie, gdy wszystkie trzy kierunki mają być traktowane równorzędnie. Jednak dokładne opisanie tym sposobem geometrii jednostki hydrogeologicznej wymaga użycia wielkiej liczby danych. Na przykład jednostka o wymiarach 10×10 km i o miąższości 50 m przy siatce poziomej 5×5 m i cięciu w kierunku pionowym 0,1 m wymaga użycia macierzy 3D o wymiarach 2000 wierszy na 2000 kolumn w 500 warstwach, co łącznie daje 2 miliardy liczb.

3. Pośrednim sposobem jest zapis międzywarstwowych powierzchni granicznych w postaci analogicznej do metod stosowanych w modelach powierzchni terenu – modelach DEM (*Digital Elevation Model*). Metodę można określić jako 2,5D. Jest ona szczególnie polecana do opisu geometrii hydrogeologicznych systemów warstwowych i można przyjąć, że prawie wszystkie systemy hydrostratygraficzne mogą być przy jej pomocy opisane poprawnie i precyzyjnie. Jedyne trudne przypadki to uskoki pionowe lub prawie pionowe i warstwy w strukturach fałdowych, szczególnie, gdy fałdy są odwrócone. Jednak mogą być one znaczące jedynie w analizie z zakresu geologii strukturalnej lub stratygraficznej, a w przypadku hydrogeologii nie mają istotnego znaczenia, ponieważ operuje się tu strefami różniącymi się między sobą wartościami parametrów hydrogeologicznych.

Z porównania przedstawionych powyżej trzech metod wynika, że zalecanym sposobem opisu geometrii systemów zawierających JCWPd jest metoda 3. (2,5D), oparta na formach stosowanych do opisu modeli DEM. Metoda 2. (3D) powinna być stosowana w wyjątkowych uzasadnionych przypadkach, a metoda 1. (2D) – gdy danych jest zbyt mało lub są zbyt mało dokładne, aby zastosować metodę 3. (2,5D).

5.3.1. Efekt proporcji geometrycznej w odniesieniu do przewodności warstw przepuszczalnych i słaboprzepuszczalnych

Fakt, że współczynnik filtracji warstwy słaboprzepuszczalnej może być o 4 rzędy mniejszy od współczynnika warstwy wodonośnej skłania do przyjęcia, że w warstwie wodonośnej woda może płynąć intensywnie, a w warstwie słaboprzepuszczalnej jedynie przesączać się w bardzo ograniczonym stopniu. Relacje takie są przedstawione na figurze 5.9A, gdzie porównuje się przewodności bryły (T^B) o kształcie prostopadłościanu (w tym przypadku sześciangu): T_Z^B dla przepływu pionowego i T_P^B dla przepływu poziomego. Przewodność pionowa pakietu górnego (zakładając, że jest to np. glina zwalowa) jest 10 000 razy mniejsza, niż przewodność pozioma pakietu dolnego (przy założeniu, że jest to piasek średnioziarnisty). Takie rozumowanie jest w pełni poprawne z jednym zastrzeżeniem – wymiary poziome tych pakietów są równe ich miąższości – stanowią one bryły równowymiarowe, co w skali przestrzennej procesów hydrogeologicznych jest bardzo mało prawdopodobne (Michalak, 2009).

Bardziej typowa w przyrodzie sytuacja jest przedstawiona na figurze 5.9B. Często mamy do czynienia z warstwami o miąższości rzędu 10 m, jednak ich rozciągłość pozioma jest znacznie większa – są to najczęściej kilometry. Wówczas, w przypadku brył nierównowymiarowych, przyjęcie rozciągłości rzędu 1 km istotnie zmienia proporcje pomiędzy przewodnością pionową warstwy słaboprzepuszczalnej i przewodnością poziomą warstwy wodonośnej. Przy takiej geometrii opór hydrauliczny w kierunku pionowym warstwy rozdzielającej warstwy wodonośne jest równy oporom hydraulicznym w kierunku poziomym warstw wodonośnych:

$$\frac{1}{T_Z^B} = \frac{1}{T_P^B}, \text{ ponieważ: } T_Z^B = T_P^B.$$

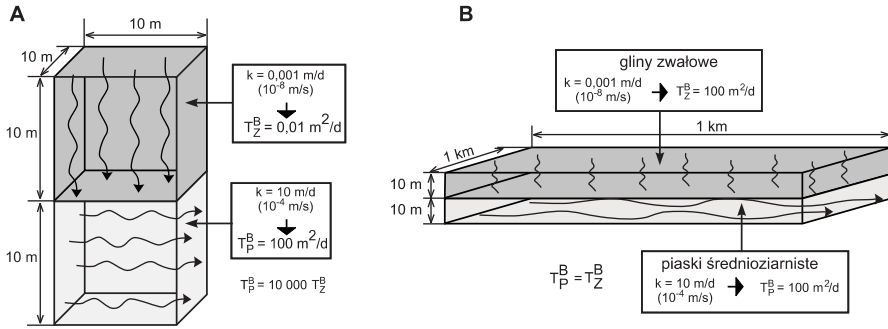


Fig. 5.9. Porównanie przewodności pionowej pakietu słaboprzepuszczalnego i przepuszczalnego w przypadku geometrii równowymiarowej (A) i nierównowymiarowej (B)

T_Z^B – przewodność pionowa pakietu słaboprzepuszczalnego, T_P^B – przewodność pozioma pakietu przepuszczalnego

Efekt skali w odniesieniu do przewodności warstw przepuszczalnych i słaboprzepuszczalnych ma bardzo istotne znaczenie, gdy porównujemy natężenie strumieni filtracji w układach wielowarstwowych. Przyjmując dla przypadku przedstawionego na figurze 5.9B gradient pionowy dla warstwy rozdzielającej jako:

$$\frac{\Delta H_Z}{M} = 0,1 \quad [5.1]$$

gdy:

$$\Delta H_Z = 1 \text{ m i } M = 10 \text{ m}$$

i gradient poziomy dla warstwy wodonośnej jako:

$$\frac{\Delta H_P}{L} = 0,001 \quad [5.2]$$

gdy:

$$\Delta H_P = 1 \text{ m i } L = 1\,000 \text{ m}$$

otrzyma się jednakowe natężenia obu strumieni:

$$Q_Z = Q_P = 100 \text{ m}^3/\text{d}$$

gdzie:

$$Q_Z = \Delta H_Z T_Z^B \quad [5.3]$$

i

$$Q_P = \Delta H_P T_P^B \quad [5.4]$$

Z powyższego wynika, że uwzględnienie efektu proporcji w odniesieniu do przewodności warstw przepuszczalnych i słaboprzepuszczalnych ma istotne znaczenie w analizie obrazu pola filtracji w systemach wodonośnych o złożonej, wielowarstwowej budowie. Można przyjąć, że obraz ten niewiele się różni od obrazu pola filtracji w prostym systemie jednowarstwowym. Przykład takiego obrazu złożonego przedstawia figura 5.10.

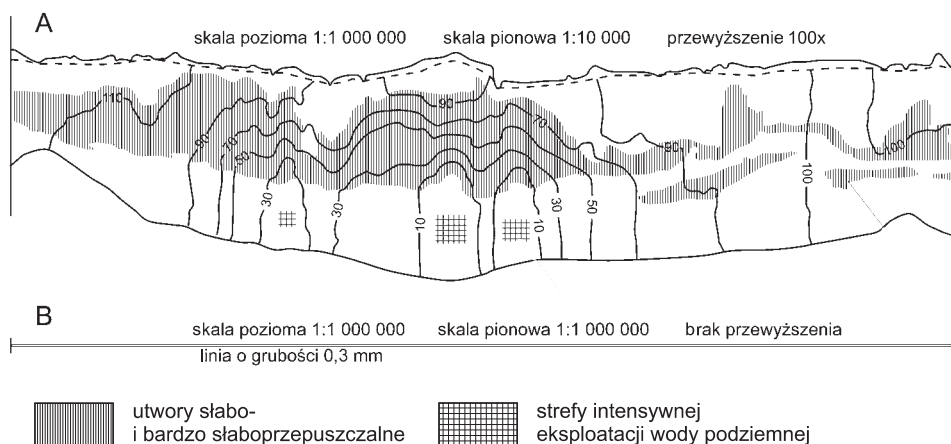


Fig. 5.10. Obraz pola filtracji przedstawiony przy pomocy linii ekwipotencjalnych na przekroju przez niekę mazowiecką. Wynik symulacji dla wariantu uwzględniającego eksploatację w poziomie oligoceńskim (Latka, Michalak, 1983; Kowalczyk i in., 2007)

A – przekrój z przewyższeniem 100-krotnym; **B** – przekrój bez przewyższenia

Przekroje hydrogeologiczne są bardzo użytecznym sposobem przedstawiania relacji geometrycznych pomiędzy wyróżnieniami wchodzącymi w skład jednostki hydrogeologicznej, niezależnie do jakiej kategorii jednostka ta jest zaliczana. Konieczność stosowania na przekrojach znacznego przewyższenia w przypadku budowy warstwowej wynika z potrzeby uwzględnienia dużej zmienności w kierunku pionowym, gdy jednocześnie zmienność w kierunku poziomym jest znacznie mniejsza. Konsekwencją tego jest zniekształcenie obrazu przedstawiającego geometrię jednostki i ma to często mylący wpływ na naszą wyobraźnię (fig. 5.10). Przykładem może być potężna seria osadów ilastych pliocenu o miąższości rzędu kilkudziesięciu metrów, przykrywająca piaski miocenu i oligocenu niecki mazowieckiej, która traktowana była jako całkowicie nieprzepuszczalna. Biorąc pod uwagę jej zasięg przestrzenny rzędu kilkuset kilometrów, strukturę należy uznać za nierównowymiarową, a relacje pomiędzy wymiarami można porównać do kartki papieru o formacie 20×30 cm i grubości 0,1 mm. Takie proporcje wymiarów przemawiają za tym, aby tę serię iłów traktować jako ciekłą błonę ilastą.

5.3.2. Metodyka interpolacji danych punktowych do siatki pokrycia macierzowego

Istotnym problemem metodycznym budowy modelu geometrycznego jednostki hydrogeologicznej, w tym także JCWPd, są odpowiednie algorytmy zaimplementowane w procedurach, przeznaczone do automatycznej interpolacji i interpretacji cząstkowych danych geologicznych na potrzeby przestrzennych modeli budowy geologicznej. Przeprowadzone badania wykazują, że powszechnie stosowane w innych zagadnieniach procedury interpolacji przestrzennej, jak np. metody wielomianowe lub metoda krigingu, nie są odpowiednie dla wyznaczania powierzchni geologicznych. Często najbezpieczniejszą, choć niedoskonałą, jest metoda interpolacji liniowej.

- forma 3D, w pełni trójwymiarowa, stosowana w wyjątkowych przypadkach ze względu na bardzo duże zbiory danych;
- forma 2,5D w postaci pokrycia macierzowego (rastrowego) powszechnie stosowana do zapisu modelu wysokościowego powierzchni, ale równie dobrze może być stosowana do dowolnych parametrów hydrogeologicznych jakiegś warstwy lub strefy.

Tak jak poprzednio, również tu preferowana jest forma trzecia (2,5D), a sens fizyczny atrybutu opisanego w postaci macierzy może być praktycznie dowolny. Dodatkowym atutem tej formy jest możliwość pełnego zastosowania algebry map (*map algebra*) opracowanej przez Dana Tomlina w latach 1980–1985 (Davis, 2001). Algebra map pozwala na wykonywanie skomplikowanych obliczeń na takich danych, co w przypadku opisu warunków hydrogeologicznych i ich analizy jest bardzo cenne. Zastosowanie algebry map do danych hydrogeologicznych jest opisane w rozdziale 6.1 i zilustrowane przykładem 6.3.

5.5. Warunki brzegowe

Równania opisujące przepływ wody podziemnej w ośrodku porowatym lub drobnoszczelinowym, należące do kategorii równań różniczkowych cząstkowych drugiego stopnia stanowią jedynie część modelu pojęciowego dotyczącego zjawisk i procesów związanych z przepływem wody podziemnej. Model pojęciowy tych zjawisk, obok równania różniczkowego, zawiera również inne elementy (Michalak, Nowicki, red., 2009), które ogólnie można określić jako składniki modelu zagadnień brzegowych, a w przypadku stanów nieustalonych, także zagadnienia początkowego. Fundament tego modelu dla stanu ustalonego stanowią pojęcia:

1. **Wnętrze** – fizyczna przestrzeń filtracji, trój-, dwu- lub jednowymiarowa, stanowiąca nieskończony zbiór punktów, które sąsiadując ze sobą leżą od siebie nieskończenie blisko. Wnętrze jest w tym przypadku wyodrębnionym fragmentem całej rzeczywistości. Wspomniane powyżej równania różniczkowe określają jedynie, jakie elementy modelu pojęciowego są w tych punktach (i punktach sąsiadujących nieskończenie blisko) brane pod uwagę i jakie są między tymi elementami rodzaje powiązań.
2. **Brzeg** (przestrzeni filtracji) – granica zamykająca w sposób całkowity przestrzeń filtracji. Jej wymiarowość przestrzenna jest o jeden stopień niższa, niż wymiarowość przestrzeni. Dla przestrzeni 3D jest to powierzchnia (2D), dla przestrzeni 2D (powierzchni) jest to linia (krzywa) zamknięta (1D), a dla przestrzeni jednowymiarowej (linii) granicę stanowią dwa punkty (0D). Brzeg nie należy do przestrzeni filtracji, a ściślej – punkty stanowiące zbiór brzegu są jedynie topologicznym otoczeniem punktów należących do zbioru przestrzeni filtracji (są jedynie ich sąsiadami). Z tego względu równania różniczkowe nie odnoszą się do punktów należących do brzegu.
3. **Otoczenie** – przestrzeń o takiej samej wymiarowości, jak fizyczna przestrzeń filtracji leżąca po przeciwnej stronie granicy, najczęściej na zewnątrz w stosunku do przestrzeni filtracji. Otoczenie może być także „wyspą” wewnątrz przestrzeni filtracji i w takim przypadku jest ono oddzielone od tej przestrzeni brzegiem wewnętrznym. Jest to jednak zagadnienie czysto topologiczne i mamy tu przynajmniej dwa otoczenia składowe (oddzielne podzbiory), stanowiące łącznie otoczenie całkowite (sumę tych podzbiorów). Zasada ta przenosi się w konsekwencji na podzbiory brzegów wewnętrznych i ich sumę – brzeg całkowity. Analogicznie do relacji brzeg–wnętrze, punkty należące do brzegu nie należą do otoczenia.

4. **Warunki brzegowe** – atrybuty przypisane punktom należącym do zbioru określającego brzeg. Tymi atrybutami mogą być wielkości fizyczne lub współczynniki określające powiązania pomiędzy wielkościami fizycznymi. Mogą one być stałe lub zmienne w czasie. Warunek brzegowy określa oddziaływanie otoczenia, czyli tego wszystkiego, co jest na zewnątrz, na wewnątrz – czyli na charakter i skalę zjawisk i procesów zachodzących w analizowanej przestrzeni ograniczonej przez brzeg.
5. **Funkcja stanu wnętrza** – kompletny opis relacji pomiędzy elementami modelu pojęciowego dotyczący tego, co dzieje się w dowolnie wybranym punkcie należącym do wnętrza pod wpływem warunków brzegowych. Do elementów tych zalicza się wielkości fizyczne charakteryzujące opisywane zjawiska i procesy, np. zmienną podstawową charakteryzującą pole fizyczne, parametry przestrzeni fizycznej i parametry stanowiące fizyczne ograniczenia rozpatrywanego procesu. Najczęściej funkcja ta ma postać uwikłaną – nie można jej wyrazić formułą $x = f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ i w większości przypadków jest to równanie różniczkowe o pochodnych cząstkowych, a jego typ zależy od fizycznej natury rozpatrywanych zjawisk i procesów.
6. **Parametry wnętrza** – atrybuty przypisane punktom należącym do zbioru stanowiącego wnętrze i określające właściwości przestrzeni stanowiącej wnętrze. Właściwości te decydują o sposobie reagowania wnętrza na czynniki zewnętrzne docierające z otoczenia i wyrażone w postaci warunków brzegowych. Sens fizyczny tych atrybutów zależy od natury fizycznej opisywanego procesu, wyrażonej przy pomocy funkcji stanu.

Powiązanie podstawowych elementów modelu pojęciowego przedstawia figura 5.12.

Relacje pomiędzy przedstawionymi powyżej podstawowymi elementami tego modelu są następujące:

1. To, co się dzieje we wnętrzu, zależy wyłącznie od czynników zewnętrznych, leżących w otoczeniu i określonych przez warunki brzegowe dla brzegu stanowiącego granicę pomiędzy wnętrzem i otoczeniem.
2. Sposób, w jaki wnętrze reaguje na czynniki zewnętrzne, zależy od funkcji stanu wnętrza, czyli równania fizyki matematycznej, opisującego analizowany proces, i od właściwości wnętrza, określonych parametrami fizycznymi zmiennymi przestrzennie, także często zależnych od czasu i wyrażonych w postaci funkcji typu: $f(x)$, $f(x, t)$, $f(x, y)$, $f(x, y, t)$, $f(x, y, z)$ lub $f(x, y, z, t)$.

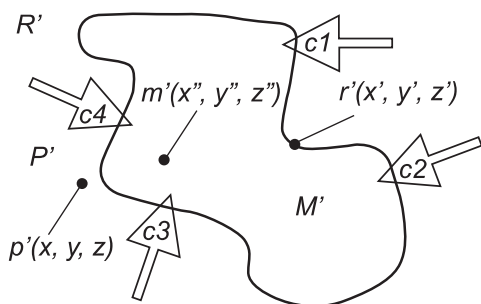


Fig. 5.12. Schematyczne powiązanie elementów podstawowego modelu pojęciowego dotyczącego ustalonego zagadnienia brzegowego (Michalak, Nowicki, red., 2009)

R' – brzeg systemu – zbiór punktów brzegowych $r'(x', y', z')$,
 M' – wnętrze systemu – zbiór punktów wnętrza $m'(x'', y'', z'')$,
 P' – otoczenie systemu – zbiór punktów należących do otoczenia $p'(x, y, z)$, $c1, c2, c3, c4$ – oddziaływania otoczenia na wnętrze systemu

3. Stan wnętrza nie ma wpływu na to, co się dzieje na granicy i w otoczeniu, a w konsekwencji na czynniki zewnętrzne i warunki brzegowe wyrażające te czynniki.
4. W typowych zagadnieniach brzegowych zakłada się niezmiennność położenia granicy pomiędzy wnętrzem i otoczeniem. Przypadki, w których ta granica może zmienić położenie pod wpływem zmian zachodzących we wnętrzu, należą do przypadków szczególnych.
5. Właściwości wnętrza wyrażone parametrami fizycznymi w typowych przypadkach również nie zależą od stanu wnętrza.

Podstawowy model pojęciowy, dotyczący zagadnień brzegowych, został tu przedstawiony jedynie schematycznie, ale na potrzeby niniejszego Informatora – wystarczająco, jednoznacznie i kompletnie. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że model pojęciowy zagadnienia brzegowego jest w pewnym stopniu abstrakcją matematyczną. W warunkach rzeczywistości fizycznej, z jaką mamy do czynienia w przyrodzie, spełnienie wszystkich wymagań tego modelu jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Z przestrzeni hydrogeologicznej trudno jest wyodrębnić system o tak określonych granicach, aby to, co się dzieje w jego wnętrzu, zupełnie nie oddziaływało na otoczenie. Z tego względu m.in. warunki brzegowe I i II rodzaju w przyrodzie w czystej formie prawie nigdy nie występują i najczęściej mamy do czynienia z warunkami III rodzaju bardzo do nich zbliżonymi (fig. 5.2).

6. WYKORZYSTANIE METOD GEOMATYKI W OPRACOWANIU DANYCH OPISUJĄCYCH SCHEMATY WARUNKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

Z ogólnego typu *WaterBody* w strukturze relacyjnej bazy danych na szczeblu ogólnoeuropejskim z zakresu RDW (fig. 6.1) są wyprowadzone dwa podtypy: *SurfaceWaterBody* i *GroundWaterBody*. Pierwszy z nich ma rozbudowaną strukturę i wiele powiązań asocjacyjnych z innymi elementami danych tej bazy. Drugi podtyp dotyczący JCWPd jest praktycznie pusty i nie powiązany z niczym innym. Jest to wymowny przykład, że prace zespołów roboczych zajmujących się implementacją tej dyrektywy są skupione prawie wyłącznie na wodach powierzchniowych. Z upływem czasu okazuje się jednak, że problematyka struktur danych dotycząca wód podziemnych jest znacznie bardziej złożona, niż danych o wodach powierzchniowych.

Początkowe wyobrażenia, że można wyodrębnić znacznych rozmiarów wyróżnienie hydrogeologiczne, które będzie jednolite i będzie mogło być scharakteryzowane dwoma podstawowymi parametrami o ilości i jakości wody, okazało się nierealne. W nowych dokumentach implementacyjnych RDW odchodzi się już od tak prostego schematu i w rezultacie JCWPd nie musi być jednolita i może się składać z części o różnych parametrach i właściwościach. Ta zmiana w podejściu do JCWPd nie znalazła jeszcze swojego wyrazu w dokumentach technicznych w postaci wyraźnych wskazówek, jak należy wyodrębniać te jednostki i w jaki sposób należy je charakteryzować. Wskazówki takie zawierają jedynie załączniki do poradnika metodycznego RDW (EC, 2009), jednak są one jeszcze w trakcie opracowywania i udostępnia się jedynie ich niepełne wersje robocze. Wśród załączników szczególnie istotne jest opracowanie dotyczące informacji geoprzestrzennej na temat JCWPd (Cullingford, 2010). Z tego powodu można zaproponować jedynie ogólne zasady, jakie stosuje się do wyodrębniania i charakteryzowania jednostek hydrogeologicznych, do których z pewnością trzeba zaliczyć także JCWPd. W obecnych czasach prawie wszystkie bardziej złożone hydrogeologiczne prace badawcze wiążą się z opracowaniem i zastosowaniem numerycznego modelu przepływu wód podziemnych. W konsekwencji metodyka przyjęta w opracowywaniu schematów warunków hydrogeologicznych na potrzeby modeli jest najbardziej odpowiednią metodyką, jaką można zaproponować dla JCWPd. W dalszej części rozdziału przedstawiony jest jej ogólny zarys.

Do chwili obecnej w Polsce opracowano już bardzo wiele różnych modeli numerycznych przepływu wód. Jednak wyniki tych żmudnych i kosztownych prac najczęściej są przedstawiane jedynie w formie syntetycznych opisów tekstowych z załącznikami tabelarycznymi i graficznymi, także w postaci map, utrwalonych na papierze. Często modele te sąsiadują ze sobą lub ich zasięg przestrzenny pokrywa się, przynajmniej częściowo, jednak wzajemne ich szczegółowe porównanie lub wykorzystanie wyników jednego modelu do opracowania innego, w jakimś stopniu z nim powiązanego, jest praktycznie zupełnie niemożliwe.

Potrzeba opracowywania takich modeli dla wybranych JCWPd wynika z konieczności obserwowania i analizy zmian, jakie zachodzą w ich obrębie. Łączny zasięg przestrzenny tych modeli może w przyszłości obejmować znaczną część obszaru Polski i wzajemne ich powiązanie nie

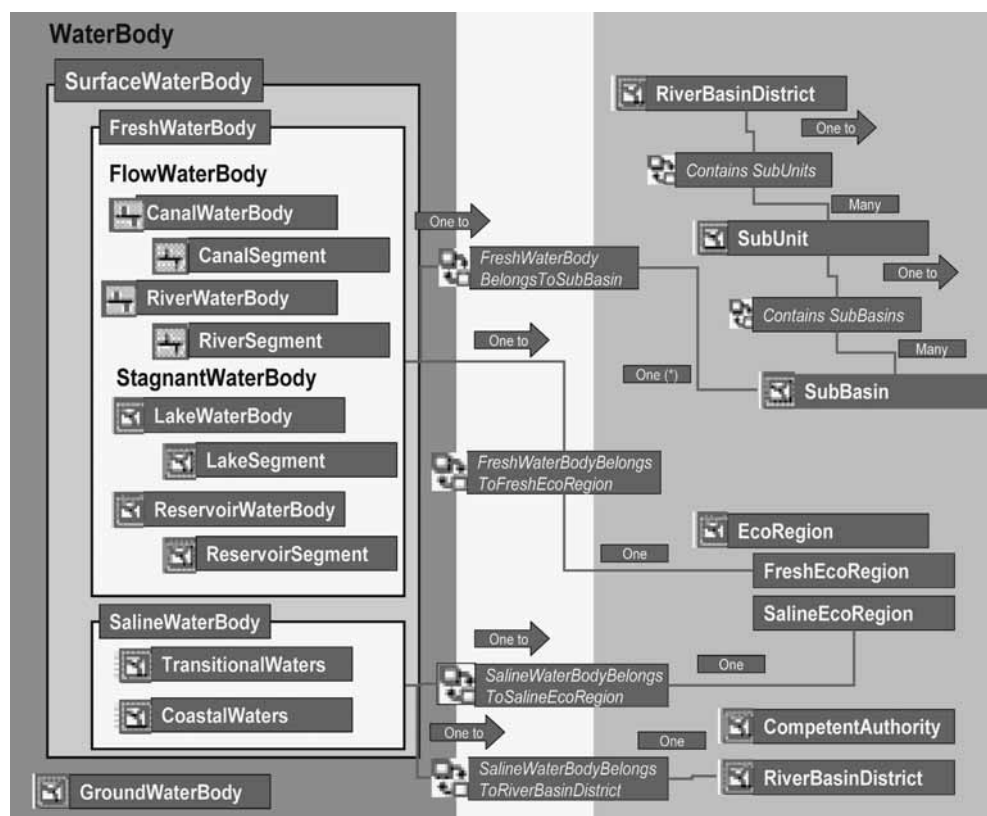


Fig. 6.1. Schemat struktury relacyjnej bazy danych z zakresu RDW

Uwagę zwraca fakt, że część dotycząca wód powierzchniowych jest znacznie rozbudowana, a dla wód podziemnych występuje tam tylko jeden element bez powiązań z innymi

może być pominięte. Podobną sytuację mamy w przypadku modeli, których zadaniem jest wyznaczenie zasobów dyspozycyjnych dla obszarów bilansowych. Również wiele takich modeli jest opracowywanych dla GZWP (głównych zbiorników wód podziemnych). Biorąc pod uwagę te wszystkie działania można przyjąć, że w niedalekiej przyszłości jedynie niewielkie fragmenty obszaru Polski nie będą miały wykonanych takich badań, a w wielu przypadkach modele te będą nakładały się na siebie przynajmniej częściowo.

Z uwagi na pracochłonność i kosztowność badań hydrogeologicznych nad schematami warunków, w tym także badań modelowych, przy tak znacznej ich liczbie koniecznością jest zastosowanie niekwestionowanej w informatyce zasady *reuse* – ponownego użycia. W przypadku modeli zasada ta powinna obejmować wszelkie dane związane z modelem, czyli: surowe dane – pozyskane z różnych źródeł, dane wejściowe – opracowane na potrzeby modelu, dane wynikowe – uzyskane z symulacji przeprowadzonych na modelu i dane stanowiące wyniki analiz wykonanych na danych wynikowych. Zasada ta powinna obejmować także informacje dotyczące metodyki i technologii zastosowanych do budowy i eksploatacji modelu. Do informacji tych należą wszelkie dane

określające strukturę modelu, użyte środki techniczne i programistyczne, nie wyłączając zapisów algorytmów obliczeniowych, skryptów i kodów programowych oprócz przypadków, gdy są one chronione prawem autorskim lub warunkami licencjonowania. Taki zestaw danych powinien zawierać wszystkie te elementy w postaci pozwalającej na pełne odtworzenie modelu, gdy w przyszłości będzie to potrzebne. Innym sposobem wykorzystania tych danych może być ponowne użycie pewnej ich części dla modelu obszaru sąsiadującego lub częściowo nakładającego się przestrzennie. Dane takie mogą być także potrzebne do przeprowadzenia dla określonego obszaru analiz opartych na wynikach więcej niż jednego modelu. Gdy np. wykonano wcześniej modele dla dwóch sąsiadujących ze sobą obszarów, to ich wyniki mogą być wykorzystane do analizy obu obszarów jako całości lub dowolnego fragmentu.

Uwzględniając to, że modeli będzie wiele i z każdym z nich są związane bardzo liczne i różnorodne dane, ich przechowywanie wymaga utworzenia odpowiednio zorganizowanego repozytorium. Sposób organizacji takiego repozytorium, a także specyfikacja struktur przechowywanych w nim danych, wymaga oddzielnego opracowania i nie jest przedmiotem tego Informatora. Jednak wyniki opisanych tu etapowych prac z zakresu schematyzacji warunków hydrogeologicznych, a także przygotowane dane wejściowe do modeli przepływu, muszą być przekazywane w ściśle określonej postaci spełniającej wymagania dotyczące zawartości i formy danych będących wynikiem prac na poszczególnych etapach. Z tego względu jednym z zadań Informatora jest wstępne określenie specyfikacji zawartości i formy danych, będących wynikiem prac na poszczególnych etapach.

Prace studialne nad schematami warunków hydrogeologicznych, przedstawione w pierwszych rozdziałach Informatora, są procesem złożonym, wieloetapowym i wielowątkowym. Na początku mamy do czynienia z danymi źródłowymi nieprzetworzonymi lub archiwalnymi. W kolejnych etapach badań modelowych dane te są poddawane różnym procedurom przetwarzającym do form odpowiednich do analiz służących głębszemu poznaniu rozpatrywanej jednostki hydrogeologicznej, w tym przypadku JCWPd. Aby ten proces przebiegał sprawnie i w pełni poprawnie, konieczne jest spełnienie kilku podstawowych wymagań z zakresu informatyki i geomatyki, a najważniejsze z nich są przedstawione poniżej:

1. Swobodny przepływ informacji pomiędzy zakresami tematycznymi modelu. W szczególności dotyczy to zagadnień geologicznych, hydrogeologicznych i hydrologicznych. Przepływ informacji jest niezbędny na wszystkich etapach przetwarzania danych – od surowych danych pierwotnych (profile wierceń, zestawienia danych pomiarowych itp.) do danych i informacji znacznie przetworzonych (mapy w formie wektorowej, interpolowane dane typu pokrycia macierzowego (rastry numeryczne), funkcje zmian warunków brzegowych itp.). Ta zasada dotyczy także danych wynikowych, które z kolei będą danymi wejściowymi do badań na modelach przepływu. Na przykład w sytuacji, gdy w wyniku niejednoznaczności ujawnionej w trakcie badań modelowych, trzeba będzie porównać rozkład przestrzenny wyliczonych wartości zasilania infiltracyjnego z mapą geologiczną utworów powierzchniowych lub z modelem powierzchni terenu.
2. Swobodny przepływ informacji z etapów wcześniejszych do aktualnego etapu badań. Powinno to dotyczyć wszystkich informacji, bez względu na ich zakres tematyczny. Przykładem może tu być potrzeba sprawdzenia uzyskanych z interpolacji we wcześniejszym etapie miąższości warstwy wodonośnej lub sprawdzenia danych w najbliższym profilu geologicznym. Potrzeba taka może wynikać z wątpliwości, jakie mogą się zrodzić na kolejnym etapie prac dotyczących mało prawdopodobnej wielkości przepływu wody, uzyskanej w wyniku symulacji w jakimś fragmencie modelu hydrogeologicznego.

3. Geomatyczna zgodność wszystkich informacji geoprzestrzennych. Dotyczy to informacji tworzonych i wykorzystywanych w trakcie prac nad schematami warunków i w trakcie badań modelowych. Przez geomatyczną zgodność rozumie się w tym przypadku m.in. zgodność: geoprzestrzennego układu odniesienia lub odwzorowania, schematu odniesienia czasowego, schematu dyskretyzacyjnego oraz jednostek miar. Często dane wejściowe pochodzą z różnych źródeł lub opracowań i przez to mają różne układy odniesienia geoprzestrzennego i czasowego, a także różne jednostki miar. Aby móc w prosty sposób takie dane porównać, trzeba je przeliczać z użyciem odpowiednich, często skomplikowanych, procedur. Brak tych procedur może uniemożliwić to porównanie.
4. Bieżąca dostępność informacji rozproszonej. Potrzebne w danym momencie informacje powinny się znajdować w systemie programowym lub być dostępne dla tego systemu jako dane lokalne (udostępniane przez inny system w lokalnym komputerze), bądź też być osiągalne za pośrednictwem sieci z innego systemu w innym komputerze. Brak bieżącej dostępności może być przyczyną znacznego przedłużenia się prac.

Spełnienie powyższych warunków jest często niemożliwe z powodów metodycznych i technicznych. Z punktu widzenia obecnej informatyki, większość narzędzi programowych stosowanych w badaniach modelowych przepływu wód podziemnych jest izolowanymi programami lub systemami programowymi, w których wymiana danych z innymi programami lub systemami odbywa się za pośrednictwem tradycyjnych metod opartych na prostym schemacie export–import. Aby powyższe cztery warunki mogły być spełnione, konieczne jest wprowadzenie interoperacyjności do narzędzi programowych stosowanych w tego rodzaju pracach.

6.1. Ogólne wymagania dotyczące struktur i form danych przestrzennych

Jednolitym częściom wód podziemnych są przypisane obszary, na których występują wyróżnienia (obiekty przestrzenne) powiązane z tymi wodami i decydujące o warunkach hydrogeologicznych występowania tych wód. Wyróżnienia te są najczęściej opisane szczegółowymi danymi przechowywanymi w zbiorach, w tym także w bazach danych, obejmujących obszar całego kraju lub określone jego fragmenty. Jak ogólnie przedstawiono w rozdziale 2, racjonalnym ze względów organizacyjnych rozwiązaniem jest utworzenie odpowiednich podzbiorów dla poszczególnych kategorii danych ograniczonych do obszarów przypisanych poszczególnym JCWPd (fig. 2.10), tak aby dla każdej JCWPd powstał zestaw zbiorów zawierający wszystkie niezbędne dane do opracowania schematu warunków hydrogeologicznych tam występujących. Przestrzenny zasięg tych danych dla określonej JCWPd wyznacza ramka ograniczająca (fig. 2.11). W konsekwencji kluczowym zbiorem danych jest granica określonej JCWPd wraz z granicami jednolitych części z nią sąsiadujących, ponieważ jest to podstawa do wyznaczenia ramek ograniczających przestrzennie poszczególne zbiory danych. Wyróżnienia te, oprócz identyfikatorów JCWPd, powinny zawierać wszystkie atrybuty przypisane do tego typu wyróżnień, zarówno wynikające z przepisów wykonawczych RDW (fig. 6.2), jak i dyrektywy INSPIRE. Na obecnym etapie prac specyfikacyjnych prowadzonych przez europejskie zespoły robocze, lista tych atrybutów jest następująca:

- europejski identyfikator JCWPd określony w przepisach wykonawczych RDW;
- krajowy identyfikator JCWPd określony w przepisach wykonawczych RDW;

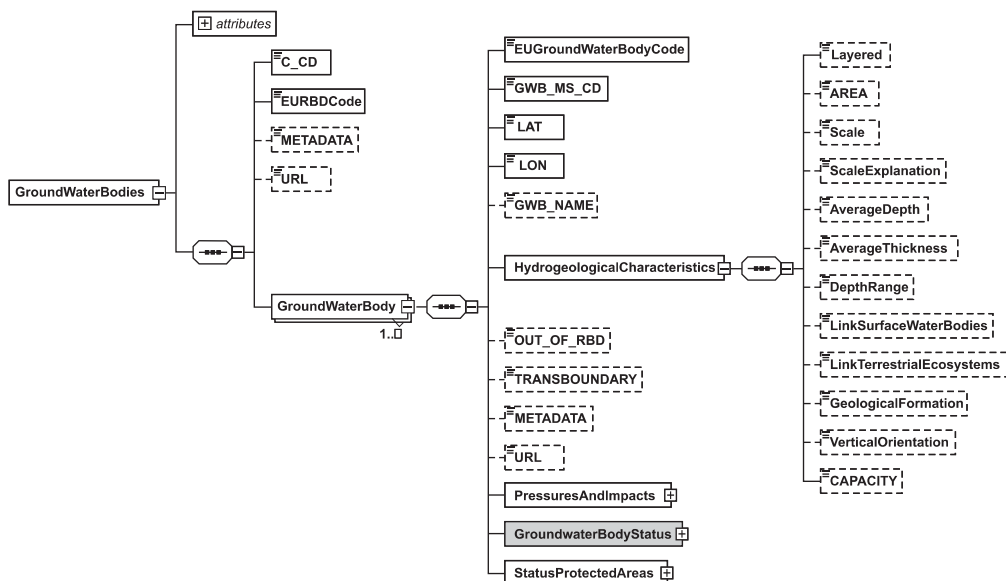


Fig. 6.2. Diagram elementów schematu XML danych opisujących JCWPd w przyjętym modelu danych systemu WISE w ramach implementacji RDW

W tym modelu przestrzenna reprezentacja JCWPd jest zrealizowana jedynie przy pomocy centroidu (punktu położonego wewnątrz obszaru objętego określoną JCWPd), którego położenie jest określone współrzędnymi kątowymi (geograficznymi) w układzie EPSG: 4258 – ETRS89/ETRS-LL

- europejski identyfikator INSPIRE, który prawdopodobnie będzie identyczny, jak RDW;
- współrzędne punktu ogólnej lokalizacji (centroidu) w przyjętym przez RDW układzie odniesienia;
- nazwa JCWPd, jeżeli taka istnieje;
- czy rozpatrywana JCWPd wykracza poza obszar dorzecza (RBD – *River Basin District*);
- czy rozpatrywana JCWPd jest transgraniczna;
- odsyłacz do pliku metadanych;
- URL odsyłający do zasobu danych dotyczących określonej JCWPd;
- lista nieobowiązkowych atrybutów charakterystyki hydrogeologicznej, w tym: wielkość obszaru, średnia głębokość, średnia miąższość, zakres głębokości, powiązane określoną JCWPd wody powierzchniowe i ekosystemy, formacja geologiczna poziomu wodonośnego i jego pojemność wodna;
- lista nieobowiązkowych atrybutów określających czynniki oddziałujące na JCWPd;
- lista atrybutów określających stan JCWPd, w tym status ilościowy i jakościowy, a także obserwowane jego zmiany;
- lista atrybutów opisujących obszary chronione, powiązane z określoną JCWPd.

Ważnym w tym przypadku zbiorem danych ze względu na przyjęte rozwiązania krajowe są główne zbiorniki wód podziemnych (GZWP) (fig. 2.9). Dla każdej JCWPd należy określić, jakie GZWP znajdują się w jej obszarze i wyznaczyć ich części leżące bezpośrednio w granicach jej obszaru. Wynika to z faktu, że warunki hydrogeologiczne poszczególnych GZWP w znacznym stopniu składają się na całość warunków hydrogeologicznych JCWPd.

Inne, istotne w tym przypadku, zbiory danych określające przyrodniczą i administracyjną lokalizację poszczególnych JCWPd to:

- regiony geologiczne – zbiór danych, określający zasięgi złodowaceń i główne jednostki strukturalne Polski środkowej i południowej;
- regiony hydrogeologiczne – zbiory danych określające:
 - regionalizację hydrogeologiczną słodkich wód podziemnych według Atlasu hydrogeologicznego Polski (fig. 6.3) (Paczyński red., 1995 w: Paczyński, Sadurski, red., 2007);
 - systemy nieprzeobrażonych antropogenicznie (SNPA) słodkich wód podziemnych (fig. 6.4) (Paczyński, 2002 w: Paczyński, Sadurski, red., 2007);
 - podział regionalny zwykłych wód podziemnych (fig. 6.5) (Paczyński, Sadurski, red., 2007);
 - regiony wodne (fig. 6.5) (Paczyński, Sadurski, red., 2007);
- regiony fizycznogeograficzne i geomorfologiczne – regionalizacja fizycznogeograficzna Polski według Kondrackiego (2009), Mapa geomorfologiczna Polski, 1:500 000, Regiony geograficzne Polski (Ołędzki, 2007), Geomorfologia Polski (Klimaszewski red., 1972; Galon red., 1972);
- regiony klimatyczne – na podstawie mapy Regiony klimatyczne w Atlasie geograficznym Polski (Okołowicz, Martyn, 1984) i publikacji Zarys klimatu Polski (Woś, 1996);
- regiony hydrograficzne – Mapa dorzeczy i głównych zlewni (fig. 6.6) (KZGW, 2008), Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 27 czerwca 2006 r. w sprawie przebiegu granic obszarów dorzeczy i regionów wodnych (Rozporządzenie..., 2006);
- mapa zmienności przestrzennej średnich wieloletnich rocznych opadów atmosferycznych (Pedros Iol, 2010);
- podział administracyjny – podstawowym zbiorem z tego zakresu jest Państwowy Rejestr Granic i Powierzchni Jednostek Podziałów Terytorialnych Kraju (PRG).

Dane te w większości nie są dostępne w formie cyfrowej i dla prac będących przedmiotem tego Informatora potrzebne jest zapisanie ich w formacie Shapefile z możliwie pełną tabelą atrybutów.

Obok powyższych zbiorów, których zadaniem jest określenie geograficznej, geologicznej, hydrologicznej i hydrogeologicznej lokalizacji określonej JCWPd, istnieje wiele zbiorów danych o zasięgu krajowym z różnego zakresu tematycznego, niezbędnych do opracowania w formie cyfrowej schematów poszczególnych JCWPd. Zbiory te należą do trzech grup:

- topograficzne dane referencyjne,
- dane z zakresu nauk o Ziemi,
- dane infrastruktury INSPIRE z zakresu 1. grupy tematycznej.

Zbiory te są dokładniej opisane w rozdziale 7.

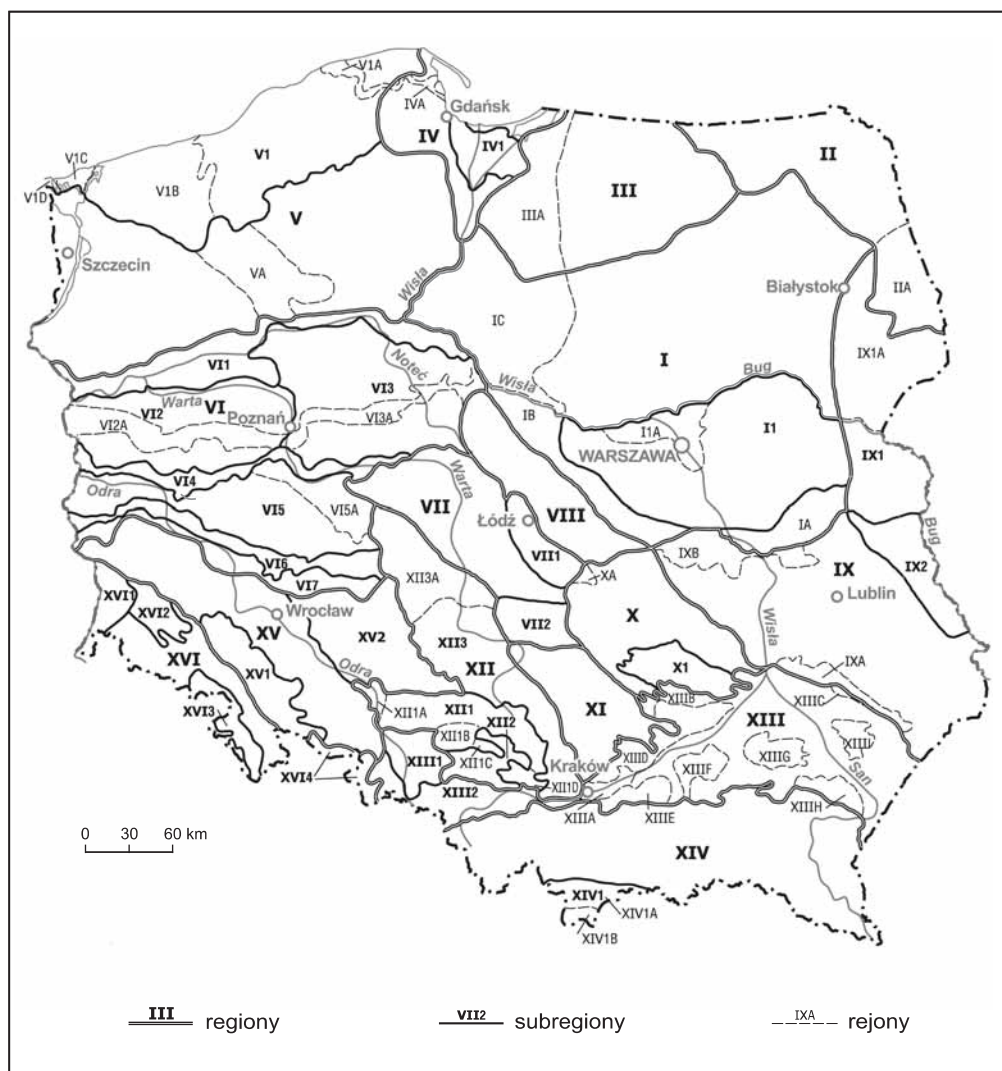


Fig. 6.3. Regionalizacja hydrogeologiczna słodkich wód podziemnych
(Paczyński red., 1995 w: Paczyński, Sadurski, red., 2007)

Zbiory danych geoprzestrzennych opisujących warunki hydrogeologiczne JCWPd stanowią obszerny, złożony i zmieniający się w czasie zasób informacji. Z tego względu prawidłowe utrzymanie takiego zasobu wymaga przyjęcia odpowiednich reguł organizacyjnych. Odpowiednią formą w tym przypadku jest repozytorium plików, którego utrzymanie i zarządzanie może być wspomagane (lecz nie musi) systemem bazy danych. Struktura repozytorium wynika z wyodrębnienia w Polsce stu kilkudziesięciu JCWPd, których liczba może ulegać zmianom. Dane dla każdej JCWPd powinny znajdować się w oddzielnym katalogu i, w miarę potrzeby, w oddzielnych

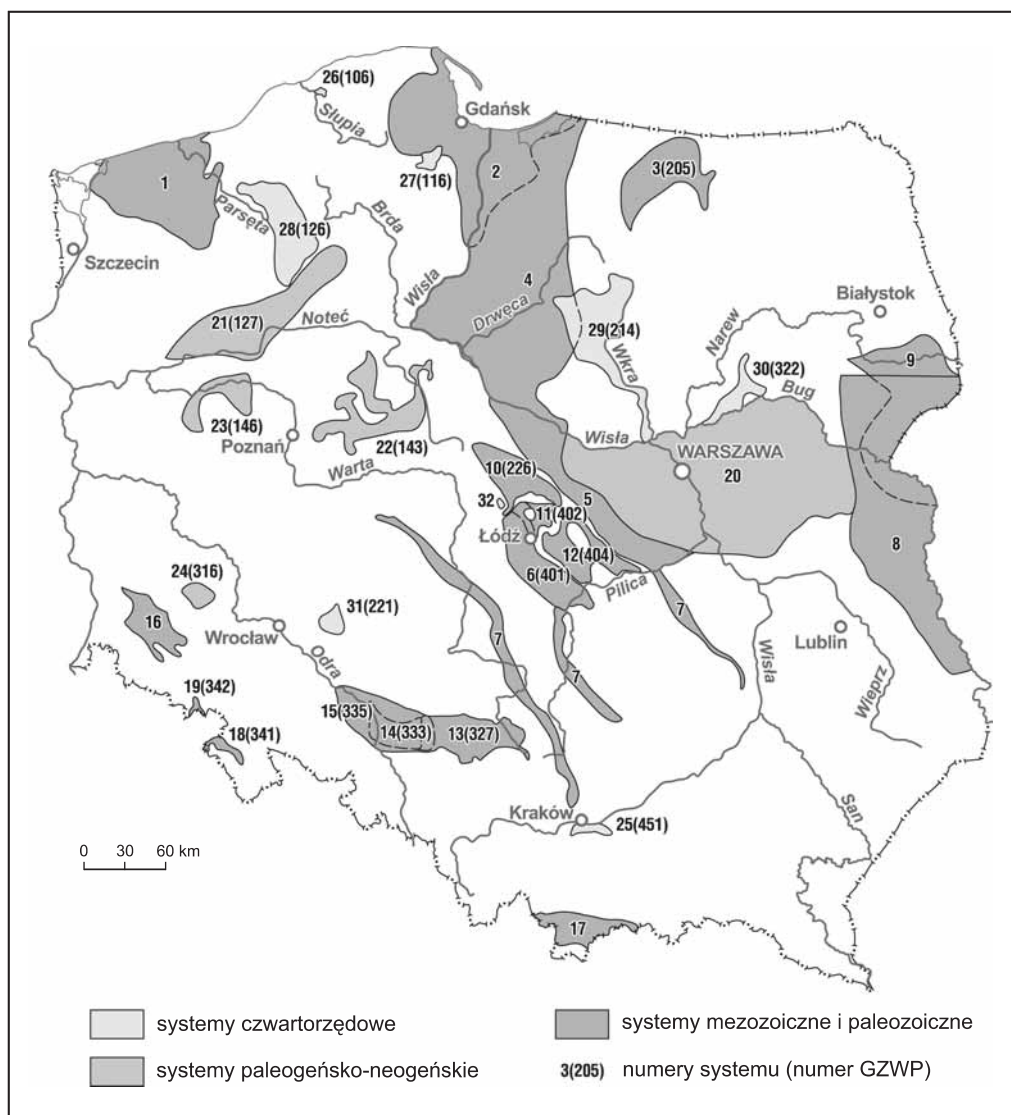


Fig. 6.4. Systemy nieprzeobrażonych antropogenicznie (SNPA) słodkich wód podziemnych (Paczyński, 2002 w: Paczyński, Sadurski, red., 2007)

podkatalogach dla nowo tworzonej wersji zestawów zbiorów danych, które często składają się z wielu plików. Zgodnie z wymaganiami przepisów wykonawczych INSPIRE, a także innych dokumentów prawnych, poszczególne zbiory danych powinny być opisane metadanymi i dla ułatwienia wyszukiwania danych metadane powinny być powiązane z jednym ogólnym katalogiem dla całego repozytorium. Przykład zorganizowanej struktury repozytorium jest przedstawiony na figurze 6.7.



Prawidłowa organizacja zbiorów danych stanowiących specyfikację warunków hydrogeologicznych wymaga również przypisania wszystkim wyróżnieniom (*features*) uniwersalnych i niepowtarzalnych identyfikatorów. Dotyczy to nie tylko pojedynczych wyróżnień (obiektów lub elementów) znajdujących się w zbiorach danych, ale także samych zbiorów, ponieważ one również należą do kategorii wyróżnień – zgodnie z normami grupy ISO 19100 zbiór wyróżnień też jest wyróżnieniem jako typ *Feature_Collection*. Także dane typu pokrycia (*coverages*) są opatrzone takimi identyfikatorami i w przypadku schematów warunków hydrogeologicznych dane tego typu, w postaci sieci kwadratów (*matrix coverage*), służą do opisu powierzchni, np. stropu lub spągu poziomu wodonośnego, a także przestrzennej zmienności parametrów fizycznych. Zasady przypisywania identyfikatorów poszczególnym wyróżnieniom określa dokument INSPIRE, opisujący ogólny model pojęciowy (*Generic Conceptual Model*) (INSPIRE DTDS, 2010), a problematyka zastosowania proponowanych tam rozwiązań w zakresie potrzeb krajowych jest przedstawiona w opracowaniu wykonanym w ramach prac prowadzonych dla tzw. Projektu Norweskiego

**Fig. 6.5. Podział regionalny zwykłych wód podziemnych
(Paczyński, Sadurski, red., 2007)**

Podział według jednostek JCWPd

Prowincja Wisły: RGW – Region górnej Wisły (SKW – subregion Karpat wewnętrznych, SKZ – subregion Karpat zewnętrznych, SZP – subregion zapadliska przedkarpackiego), RŚW – Region środkowej Wisły (SŚWW – subregion wyżynny, SŚWN – subregion nizinny), RDW – Region dolnej Wisły (SP – subregion pojezierny, SŻW – subregion Żuław Wiślanych, SZW – subregion Zalewu Wiślanego), RB – Region Bugu (SBW – subregion wyżynny, SBN – subregion nizinny), RNPn – Region Narwi, Pregoły i Niemna

Prowincja Odry: RGO – Region górnej Odry, RŚO – Region środkowej Odry (SŚOPn – subregion północny, SŚOPd – subregion południowy, SS – subregion Sudetów), RW – Region Warty (SWW – subregion wyżynny, SWN – subregion nizinny), RDO – Region dolnej Odry

Prowincja wybrzeża i pobrzeża Bałtyku: RZP – Region zachodniopomorski, RWP – Region wschodniopomorski

Podział według jednostek hydrogeologicznych (AHP)

Prowincja niżowa: I – Region warszawski (środkowomazowiecki) (I₁ – subregion pojezierny), II – Region mazowiecko-mazursko-podlaski (II₁ – subregion nadmorski, II₂ – subregion pojezierny), III – Region pomorski (III₁ – subregion nadmorski), IV – Region wielkopolski (IV₁ – subregion pojezierny), V – Region dolnośląski, VI – Region przedgórski (VI₁ – subregion przedkarpacki, VI₂ – subregion przedsudecki)

Prowincja wyżynna: VII – Region lubelsko-radomski, VIII – Region świętokrzyski, IX – Region kutnowski (IX₁ – subregion pojezierny), X – Region mogileńsko-lódzko-nidziański (X₁ – subregion pojezierny (basen mogileński); X₂ – subregion łódzki; X_{2A} – rejon (cokół) bełchatowski; X₃ – subregion nidziański), XI – Region jury krakowsko-częstochowskiej, XII – Region triasu śląskiego, XIII – Region Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Prowincja górska: XIV – Region sudecki (XIV₁ – subregion (basen) Sudetów wewnętrznych, XIV₂ – subregion (basen) Sudetów zewnętrznych), XV – Region karpacki (XV₁ – subregion Karpat wewnętrznych; XV_{1A} – rejon (cokół) tatrzański, XV_{1B} – rejon (basen) podhalański; XV₂ – subregion Karpat zewnętrznych)



(BGWM, 2009). Przykład 6.1 przedstawia ogólne zasady konstrukcji identyfikatora wyróżnienia geoprzestrzennego (obiektu lub elementu), zgodne z wymaganiami INSPIRE oraz zastosowanie takiego identyfikatora do danych opisujących schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd.

Poprawne zastosowanie uniwersalnych niepowtarzalnych identyfikatorów dla wyróżnień (obiektów, pokryć, obserwacji, pomiarów i całych zbiorów danych) wymaga precyzyjnego, trwałego i starannie przemyślanego określenia przestrzeni nazw poszczególnych grup zbiorów danych. Pod pojęciem grupy w tym przypadku rozumie się:

- serię zbiorów danych, np. Mapa hydrogeologiczna Polski 1:50 000;
- bazę danych, np. o odwiertach, ujęciach i źródłach wód podziemnych – Bank HYDRO;
- inne dowolne zasoby danych geoprzestrzennych o wyraźnie wydzielonej tematyce i dostatecznie jednorodnej organizacji.

W obrębie ustalonej przestrzeni nazw niepowtarzalność identyfikatorów zapewnia technologia informatyczna oparta na standardzie ISO UUID (*Universally Unique Identifier* – ISO/IEC 11578: 1996). Identyfikator może być użyty tylko raz, tylko dla jednego wyróżnienia i wyróżnienie to może mieć tylko jeden identyfikator przez cały czas swojego istnienia. Dzięki tym warunkom identyfikator realizuje tożsamość wyróżnienia, co pozwala ustalić, czy dwa egzemplarze obiektów informatycznych zawierające identyfikatory odnoszą się do jednego wyróżnienia, czy do dwóch różnych o identycznym opisie. Inną istotną rolą identyfikatorów jest umożliwienie

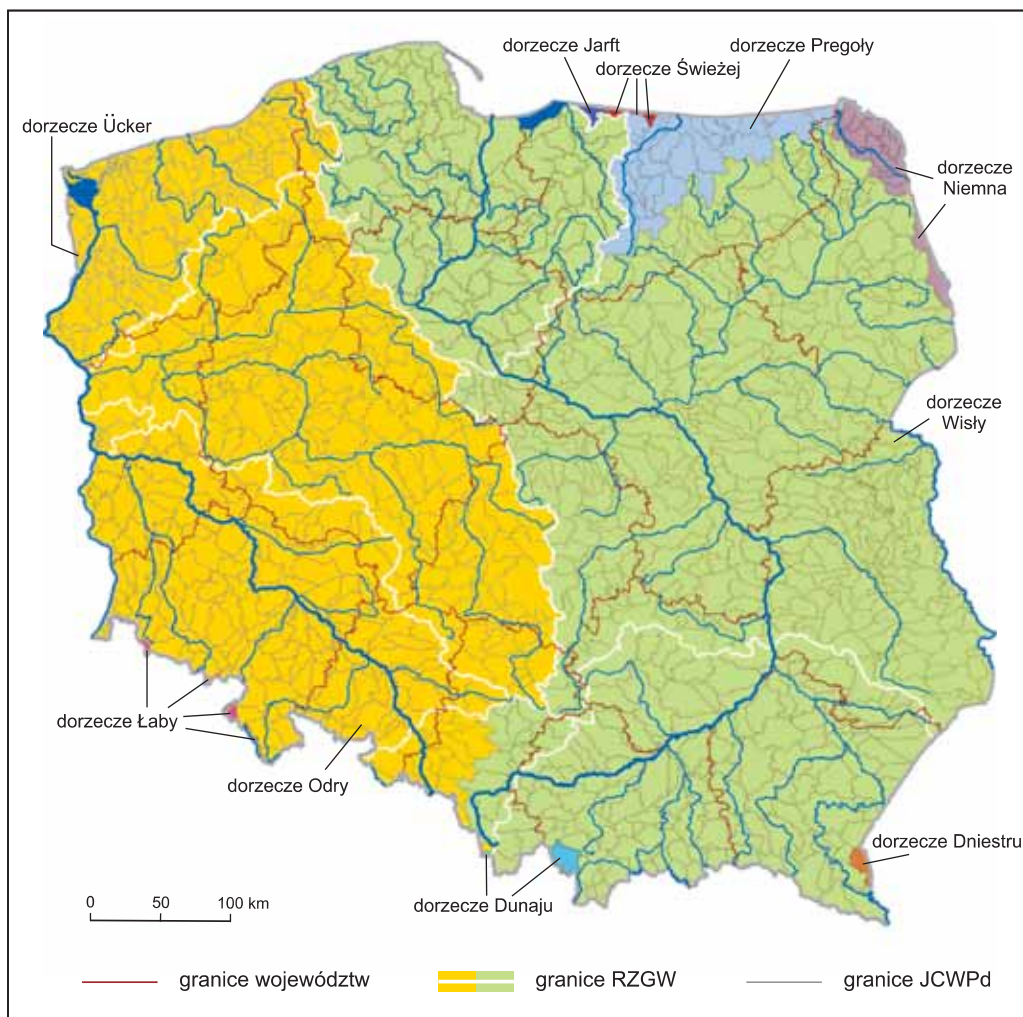


Fig. 6.6. Mapa dorzeczy i głównych zlewni (KZGW, 2008)

nie tworzenia asocjacji (powiązań) pomiędzy wyróżnieniami. Na przykład studnia jako ujęcie wody podziemnej może być powiązana z określonym poziomem wodonośnym, ten może być powiązany z jednostką hydrogeologiczną, w której woda podziemna wchodzi w skład JCWPd, a JCWPd jest przypisana do określonej zlewni powierzchniowej. Asocjacje takie pozwalają na nawigację pomiędzy wyróżnieniami, np. od studni do zlewni lub odwrotnie. W ten sposób można ustalić, do jakiej zlewni w rozumieniu RDW jest przypisana określona studnia lub znaleźć wszystkie studnie przypisane do określonej zlewni. Asocjacje mogą być jedno- lub dwukierunkowe i od tego zależą możliwości nawigacyjne. Asocjację dwukierunkową w zapisie języka GML schematu aplikacyjnego danych tematu Obszary chronione dyrektywy INSPIRE przedstawia przykład 6.2.

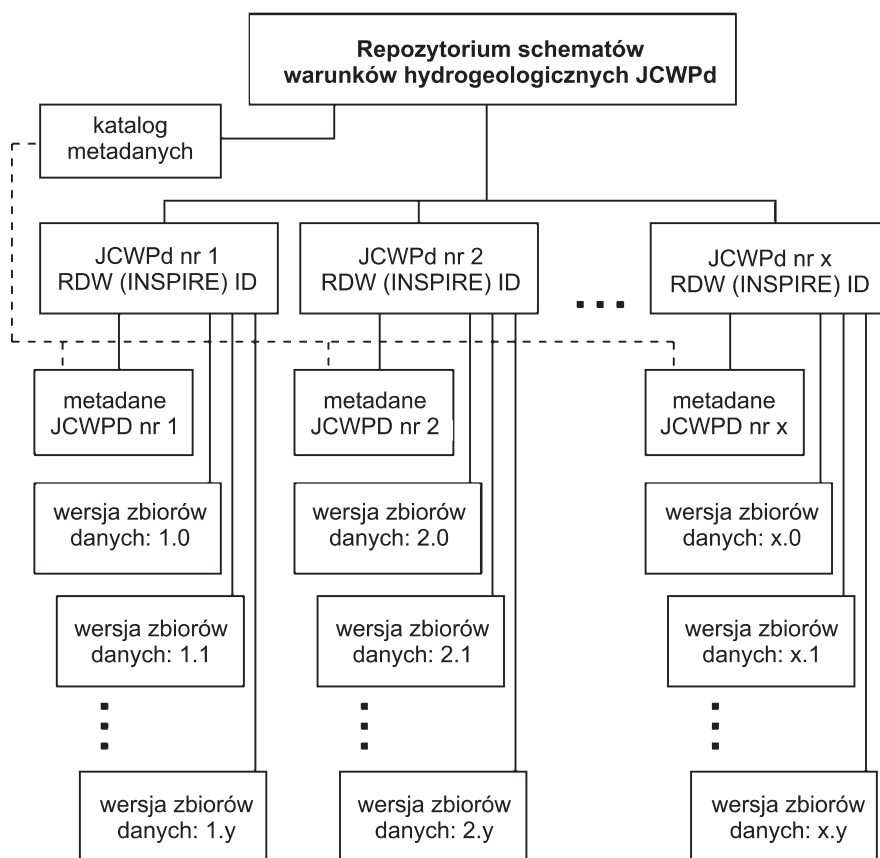


Fig. 6.7. Przykład struktury repozytorium zbiorów danych opisujących schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd

Dane geoprzestrzenne różnią się od innych tym, że są przypisane do określonych miejsc na Ziemi. Normy grupy ISO 19100 określają dwa sposoby przypisania: bezpośrednie – przy pomocy współrzędnych określonego przestrzennego układu odniesienia (SRS – *Spatial Reference System*) i pośrednie – przy pomocy identyfikatorów geograficznych, czyli nazw geograficznych lub innych znanych powszechnie określeń miejsca, np. punkty adresowe. W zaawansowanych zastosowaniach prawie wyłącznie stosuje się odniesienia bezpośrednie i wymaga to określenia układu, w jakim współrzędne są podane. W przedsięwzięciach wynikających z dyrektyw Unii Europejskiej przyjmuje się dwie kategorie układów – ogólnoeuropejskie i układu krajów członkowskich. Pierwsze mają zastosowanie w przypadku danych o zasięgu całego kontynentu i danych przekazywanych w sprawozdaniach do Komisji Europejskiej. Druga kategoria dotyczy danych o zasięgu terytoriów poszczególnych krajów członkowskich z zastrzeżeniem, że istnieją stosunkowo proste metody przeliczania współrzędnych do układów ogólnoeuropejskich. Tabela 6.1 zawiera zestawienie układów odniesienia stosowane w Polsce i należące do obu tych kategorii.

Przykład 6.1. Konstrukcja identyfikatora wyróżnienia geoprzestrzennego (obiektu lub elementu)

Konstrukcja jest zgodna z wymaganiami INSPIRE – *Genetic Conceptual Model* (INSPIRE DTDS, 2010) i proponowana do zastosowań w polskiej Infrastrukturze Informacji Przestrzennej (BGWM, 2009)

Reguły ogólne:

Przestrzeń nazw			Identyfikator lokalny (niepowtarzalny)
KK.SSS.GGGGG			uuuuu-wwwww-xxxxx-yyyyy-zzzzz
Kraj	Instytucja	Grupa	typu UUID (Universally Unique Identifier) 128 bitów: liczby heksadecymalne w 5 grupach

identyfikator wersji (data i godzina), przykład:
versionId = 2009-01-10T12:12:12+01:00

przykład dla JCWPd:

PL.PSH.JCWPd : 550e8400-e29b-41d4-a716-446655440000

zapis w XML:

```
<geo:inspireId>
  <base:Identifier>
    <base:localId>550e8400-e29b-41d4-a716-446655440000</base:localId>
    <base:namespace>PL.PSH.JCWPd</base:namespace>
    <base:versionId>2009-01-10T12:12:12+01:00</base:versionId>
  </base:Identifier>
</geo:inspireId>
```

zapis w GML:

```
<gml:identifier codeSpace="http://www.psh.gov.pl/">
  urn:PL.PSH.JCWPd:id:550e8400-e29b-41d4-a716-446655440000
</gml:identifier>
```

Uwzględniając uwarunkowania stosowania poszczególnych układów odniesienia i stosunkowo proste przeliczanie układu w obrębie grupy układów ETRS89 przyjmuje się, że dla danych geoprzestrzennych opisujących schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd najodpowiedniejszy jest układ ETRS89/Poland CS92 określany kodem EPSG: 2180. Kod ten składa się z przestrzeni identyfikatorów EPSG (*European Petroleum Survey Group*) i przyjętego w tej przestrzeni identyfikatora układu odniesienia 2180.

W celu uniknięcia problemów przy przetwarzaniu danych wymagane jest pełne i precyzyjne zdefiniowanie tego układu zarówno w zbiorach danych, jak i w systemach typu GIS przetwarzających te dane. Z tego względu w dodatku B (B.1–B.14) są podane pełne poprawne definicje stosowane w różnych formatach zapisu danych i w różnych systemach geoinformatycznych (Butler i in., 2007).

Przykład 6.2. Wzajemne powiązanie elementów zapisu danych w języku GML

Powiązania takie są realizowane z wykorzystaniem asocjacji opartych na identyfikatorach wyróżnień i wbudowanego w ten język mechanizmu *xlink:href* – jednego z wielu rozszerzeń XML (Michalak, 2010b). Przykład ten jest fragmentem zapisu opartego na schemacie aplikacyjnym tematu „Obszary chronione” dyrektywy INSPIRE i dotyczy powiązania pomiędzy obszarem (miejscem) chronionym i instytucją dbającą o ochronę. W tym przypadku identyfikatory mają inną konstrukcję, niż w przykładzie 6.1, ponieważ są oparte na standardzie URN (*Uniform Resource Name*)

```
<PS:ProtectedSite gml:id="SKSAZP12345">
  <gml:identifier codeSpace="http://inspire.jrc.ec.europa.eu/"
    urn:x-inspire:object:id:SKSAZP:12345
  </gml:identifier>
  <PS:isManagedBy xlink:href="urn:x-inspire:object:id:SKSAZP:25551"/>
</PS:ProtectedSite>
....
<PS:ResponsibleAgency gml:id="SKSAZP25551">
  <gml:identifier codeSpace="http://inspire.jrc.ec.europa.eu/"
    urn:x-inspire:object:id:SKSAZP:25551
  </gml:identifier>
  <PS:isResponsibleFor xlink:href="urn:x-inspire:object:id:SKSAZP:12345"/>
</PS:ResponsibleAgency>
```

W naukach o Ziemi, w tym w geologii i hydrogeologii, stosowane są różne rodzaje i formy danych geoprzestrzennych nie stosowane lub rzadko stosowane w innych dziedzinach. Obok typowych danych w postaci wektorowej dotyczących wyróżnień (*features*) lub ich kolekcji (*features collection*), w wielu przypadkach dane hydrogeologiczne wymagają zapisu w formie odpowiedniej dla danych typu pokrycia (*coverage*) (Michalak, Leśniak, 2003). Ta forma zapisu danych stosowana jest w modelach powierzchni terenu (DEM – *Digital Elevation Model*) i najczęściej jest to tablica liczb odnoszących się do regularnej (najczęściej kwadratowej) siatki punktów, które w kolumnach mają jednakową współrzędną wschodnią (*easting*), a w wierszach jednakową współrzędną północną (*northing*). Tego rodzaju formy zapisu są w normach ISO 19121, 19123, 19124 i 19129 określane jako ciągle pokrycia z siatką czworoboczną (*CV_ContinuousQuadrilateralGridCoverage*). Są one nazywane także pokryciami macierzowymi, gridami lub rastrami. Najczęściej stosowanym typem z tej kategorii jest siatka kwadratowa o bokach równoległych do siatki współrzędnych przyjętego układu odniesienia. Model pojęciowy ISO dla tej kategorii danych jest przedstawiony na figurze 6.8. W schematach warunków hydrogeologicznych ten rodzaj zapisu danych może być stosowany do powierzchni stropowych i spągowych poziomów wodonośnych, a także do zapisu przestrzennej zmienności parametrów fizycznych – w takim przypadku liczby w tablicy nie dotyczą wysokości, lecz określonej wielkości fizycznej. Cenną zaletą takiego zapisu danych jest możliwość stosowania do nich algebry map, co pozwala na wykonywanie wielu różnych operacji na tych danych i na przeprowadzanie złożonych analiz przestrzennych. Zastosowania algebry map do danych hydrogeologicznych zilustrowane są przykładem 6.3.

Dane typu macierzowego mają szerokie zastosowanie w modelach przepływu wód podziemnych i często stanowią podstawową formę zapisu zarówno danych wejściowych, jak i wynikowych. Ponieważ wiele systemów geoinformatycznych (typu GIS) stwarza możliwość przetwarzania takich danych, w tym przekształcania danych w formie wektorowej do formy rastrowej, wskazane jest, aby były szeroko stosowane w cyfrowym opisie schematów warunków hydrogeologicznych.

Tabela 6.1

Zestawienie podstawowych układów odniesienia stosowanych w Polsce i w przedsiębiorstwach Unii Europejskiej wynikających z zaleceń dyrektyw RDW i INSPIRE

Kod EPSG	Nazwa	Jednostki	Oznaczenie i kierunek współrzędnych		Zasięg
			1.	2.	
Opis i format definicji układu w systemie PROJ4: +proj=<Projection name> +lat_0=<Latitude of natural origin> +lon_0=<Longitude of natural origin> +k=<Scale factor at natural origin> +x_0=<False Easting> +y_0=<False Northing> +ellps=<Ellipsoids name> +units=<Units name> +no_defs					
Dla Polski					
EPSG: 2180	ETRS89/Poland CS92	m	x(N)	y(E)	cała Polska
+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.999300 +x_0=500000 +y_0=-5300000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs					
Dla Europy (także Polska z obszarami przyległymi)					
EPSG: 3045	ETRS89/ETRS-TM33	m	N	E	Europa – pomiędzy 12°E i 18°E
+proj=utm +zone=33 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs					
EPSG: 3046	ETRS89/ETRS-TM34	m	N	E	Europa – pomiędzy 18°E i 24°E
+proj=utm +zone=34 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs					
EPSG: 3035	ETRS89/ETRS-LAEA	m	Y(N)	X(E)	cała Europa
+proj=laea +lat_0=52 +lon_0=10 +x_0=4321000 +y_0=3210000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs					
EPSG: 3034	ETRS89/ETRS-LCC	m	N	E	cała Europa
+proj=lcc +lat_1=35 +lat_2=65 +lat_0=52 +lon_0=10 +x_0=4000000 +y_0=2800000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs					
EPSG: 4258	ETRS89/ETRS-LL	deg	Lat	Long	cała Europa
+proj=longlat +ellps=GRS80 +no_defs					

Układ współrzędnych 2000 (EPSG: 2176, 2177, 2178, 2179) nie jest tu uwzględniony, ponieważ jest przeznaczony do map wielkoskalowych (bardziej szczegółowych niż 1:10 000), nie stosowanych w hydrogeologii w zakresie danych dotyczących JCWPd

Rozporządzenie Komisji Europejskiej (2010) związane z implementacją dyrektywy INSPIRE określa wymagania stawiane siatkom, które są geometryczną podstawą zapisu danych typu pokrycia macierzowe. Na liście przyjętych tam podstawowych modułów są wartości: 1, 10, 100, 1000, 10 000 i 100 000 m. W przypadku danych opisujących warunki hydrogeologiczne JCWPd, najbardziej odpowiednim modułem podstawowym jest 500 m i na bazie tego modułu mogą być tworzone siatki bardziej szczegółowe, np. 250 lub 166,7 m, w zależności od wielkości rozpatrywanej JCWPd, stopnia szczegółowości schematu i przyjętej metody podziału siatki. Proponowane tu sposoby podziału siatki na elementy mniejsze, o większej gęstości, są przedstawione w rozdziale 6.2.4 i na figurach 6.15 i 6.16, a przypisanie atrybutów elementom tych siatek – na figurze 6.17.

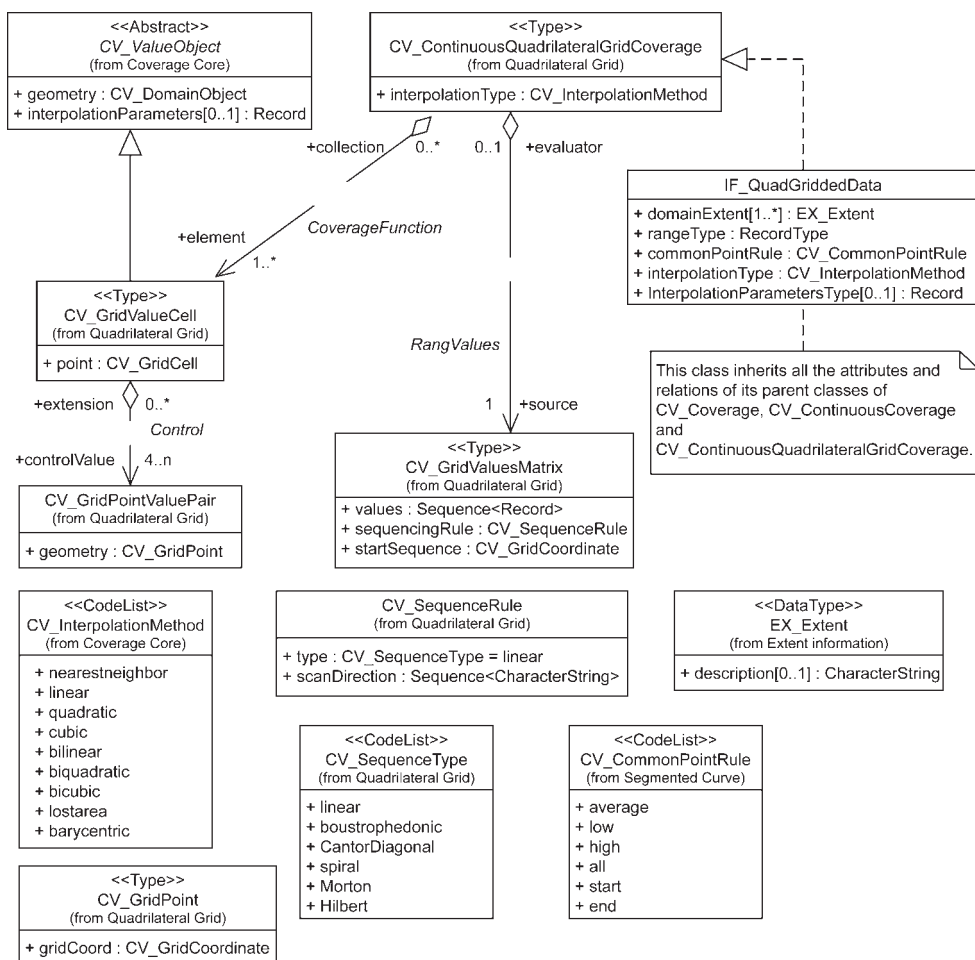


Fig. 6.8. Model pojęciowy szablonu aplikacyjnego komponentów typu pokrycia z siatką czworoboczną (*Quadrilateral Grid*) (ISO TC 211, 2009)

Przykład 6.3. Zastosowania algebry map do wyliczenia przestrzennej zmienności przewodności wodnej na podstawie zmienności współczynnika filtracji i rzędnych stropu i spągu warstwy wodonośnej

Dane wejściowe:

StPW – pokrycie macierzowe (tablica liczb) opisujące strop poziomu wodonośnego [m],

SpPW – pokrycie macierzowe opisujące spąg poziomu wodonośnego [m],

KPW – średnia wartość współczynnika filtracji poziomu wodonośnego [m/d],

Operacja z zakresu algebry map:

TPW = (StPW – SpPW) * KPW (* – operator mnożenia)

Wynik:

TPW – przewodność wodna poziomu wodonośnego [m²/d].

6.1.1. Wymagania dotyczące danych wynikające z potrzeby ich przetwarzania z zastosowaniem systemów geoinformatycznych

Obecny poziom rozwoju metod modelowania hydrogeologicznego, opracowywania schematów warunków hydrogeologicznych i metod przetwarzania danych do modeli w systemach geoinformatycznych sprawia, że budowanie schematów i modeli, a następnie ich wykorzystywanie bez ścisłego powiązania z systemami geoinformatycznymi (GIS) jest podejściem nieracjonalnym. Systemy geoinformatyczne niezwykle przyspieszają prace nad modelami i sprawiają, że dane tych modeli są znacznie pełniejsze, dokładniejsze i bardziej szczegółowe, a także pozbawione wielu błędów pochodzących ze źródeł i z przetwarzania. W konsekwencji, możliwie jak najszersze stosowanie systemów geoinformatycznych jest uzasadnioną koniecznością, szczególnie gdy planuje się integrację i harmonizację wielu modeli. Przykład zharmonizowanych modeli przepływu o różnym stopniu szczegółowości z siatkami o różnych modułach jest przedstawiony na figurze 6.9.

Z przedstawionych powyżej powodów wynika potrzeba określenia, w jaki sposób i w jakiej formie powinny być zbierane i przetwarzane dane, które posłużą do opracowania tych modeli i analizy ich wyników lub opracowania schematów warunków. W rozdziale 6.2.4 zostały określone wymagania dotyczące właściwości geometrycznych danych typu pokrycie w formie macierzowej (rastrów numerycznych) poprzez zdefiniowanie wspólnej siatki dyskretyzacji w układzie ETRS89/Poland CS92. Przedstawiono tu koncepcję dotyczącą formatów tych danych,

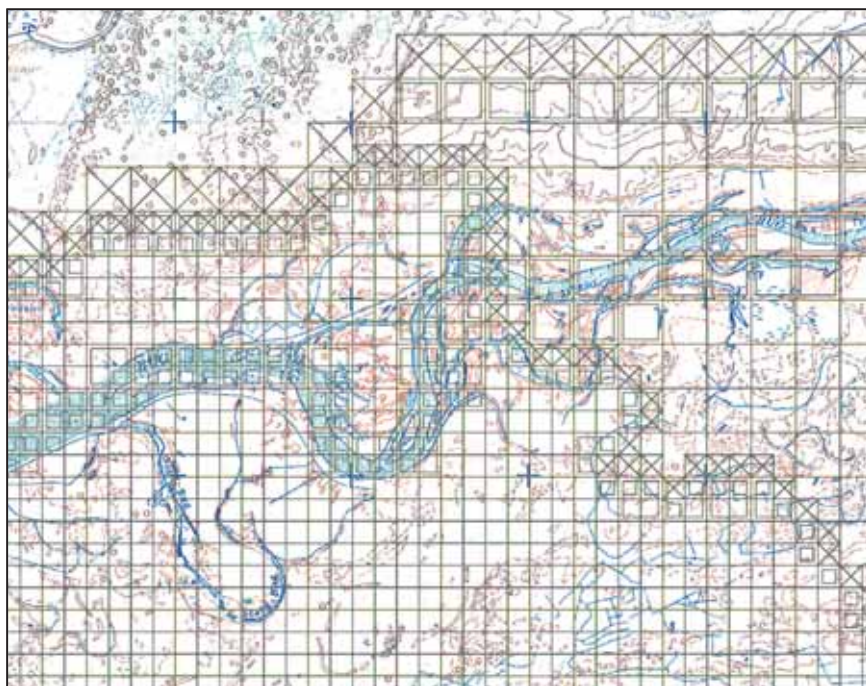


Fig. 6.9. Fragment siatki dwóch zharmonizowanych modeli przepływu o różnym stopniu szczegółowości

a także innych, w tym w formie wektorowej i tabelarycznej. Odniesienie geoprzestrzenne wszystkich danych (w każdej formie) powinno być wyrażone w układzie aktualnie obowiązującym w Polsce i najodpowiedniejszym dla takich zastosowań. Jeżeli pozyskane dane archiwalne mają odniesienie przestrzenne określone w innym układzie, np.: 1942 (EPSG: 3329 do 3335), 1965 (EPSG: 3120 i 2171 do 2175), 1980 (EPSG: 3328), WGS84-UTM (EPSG: 32633 do 32635) i WGS84_LL (EPSG: 4326), powinny być przy pomocy odpowiednich programów narzędziowych przeliczone na ETRS89/Poland CS92 (EPSG: 2180).

Najbardziej odpowiednim obecnie w Polsce sposobem zapisu danych geoprzestrzennych, do których zalicza się zdecydowana większość danych modeli hydrogeologicznych, jest język znacznikowy GML (*Geography Markup Language*), należący do rodziny języków opartych na XML (*eXtensible Markup Language*) i przeznaczony do zapisu geoinformacji poprzez różne jego aplikacje dziedzinowe. Potrzeba stosowania tego języka wynika z szeregu obowiązujących w Polsce regulacji prawnych, m.in. z dyrektywy INSPIRE, norm grupy ISO 19100 (przyjętych jako normy europejskie CEN i normy polskie PN), a także wiele już przyjętych i jeszcze opracowywanych szczegółowych przepisów wykonawczych. Praktyczne zastosowanie tego języka wymaga opracowania schematu aplikacyjnego dedykowanego określonej dziedzinie zastosowań. Figura 6.10 przedstawia zestawienie aplikacji tego języka do zastosowań hydrogeologicznych i geologicznych, a także wzajemne powiązania poszczególnych schematów aplikacyjnych z tego zakresu. Jednak język ten jest mało znany, szczególnie w środowiskach zawodowych niezwiązanych bezpośrednio z zagadnieniami geoinformacji, do których należą także hydrogeolodzy. Inną trudnością w zastosowaniu tego języka jest fakt, że niewiele spośród stosowanych powszechnie syste-

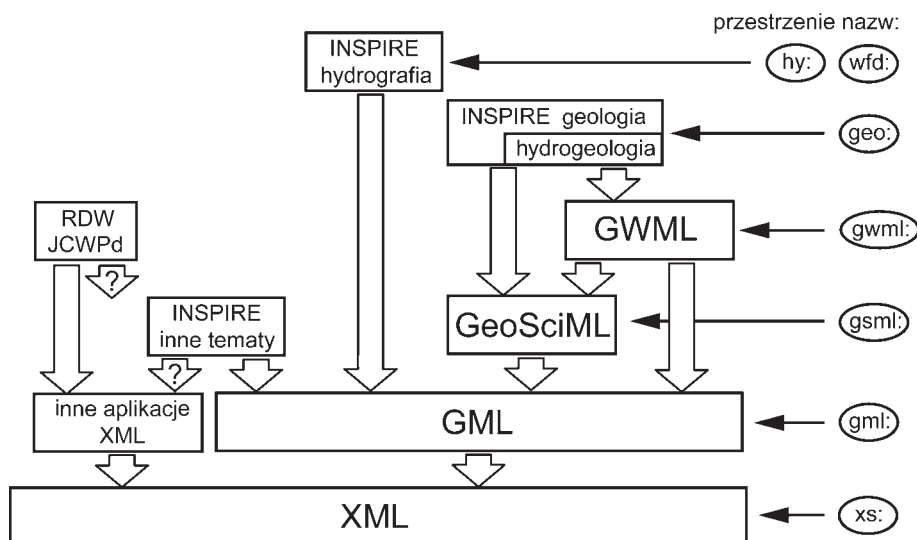


Fig. 6.10. Aplikacje języka XML stosowanych do zapisu danych hydrogeologicznych

Strzałki pionowe określają zależności pomiędzy poszczególnymi aplikacjami, np. język GWML wykorzystuje elementy zdefiniowane w językach GeoSciML i GML (Michalak, 2005). Strzałki poziome przypisują poszczególnym aplikacjom przestrzenie nazw elementów, np. schematy specyfikacji danych tematu „Geologia” dyrektywy INSPIRE definiują elementy z przestrzeni „geo-”

mów geoinformatycznych potrafi zapis taki czytać i tworzyć. Z tych względów język GML należy traktować jako propozycję docelową w przyszłości, a w obecnych warunkach stosować formy zapisu najbardziej rozpowszechnione, spełniające jednocześnie wymagania interoperacyjności w zakresie wymiany danych. Ze względu na te ograniczenia proponuje się dane modeli hydrogeologicznych podzielić na trzy kategorie:

1. Dane typu pokrycie (*coverage*). Należą do nich dane w formie macierzowej (rastry numeryczne), dotyczące bezpośrednio modeli lub pozyskane z innych źródeł i przeznaczone do wykorzystania w modelach. Do tej kategorii należą także ortoobrazy, jak np. ortofotomapy i zdjęcia satelitarne wielospektralne. Wspólną ich cechą jest wymagana w takich przypadkach definicja siatki dyskretyzacyjnej lub teselacyjnej.
2. Dane typu wyróżnienie (*feature*). Są to wszelkie geoinformacje dotyczące wydzielen hydrogeologicznych i geologicznych o granicach ostrych, a także rozmytych, różnorodnych obiektów sztucznych i naturalnych. Do tej kategorii należą także różne zdarzenia, w tym obserwacje i pomiary łącznie z wynikami. Najczęściej stosowaną w tym przypadku formą określenia położenia jest wektorowy zapis geometrii w postaci obszarów (poligonów), linii (łamanych) i punktów. Dobór odpowiedniego typu geometrycznego zależy od charakteru wyróżnienia i od stopnia szczegółowości (najczęściej określanego przy pomocy skali mapy), inaczej ujmując – od stopnia generalizacji.
3. Dane tabelaryczne dotyczące określonych miejsc, których położenie jest wyrażone parą współrzędnych, np. długość i szerokość geograficzna, lub współrzędnych x i y określonego układu odwzorowania. Pojedynczy zbiór takich danych (pojedynczą tablicę) można traktować jako najprostszyp przypadk relacyjnej bazy danych – bazy jednej relacji, gdzie wiersze tablicy są rekordami (krotkami) opisującymi poszczególne encje, a kolumnę tworzą jednakowe pola przypisane do określonych atrybutów, które mogą mieć różne typy wartości, np. tekstowe lub liczbowe. Aby taka tabela mogła być zbiorem danych geoprzestrzennych, musi mieć dwie kolumny (dwa atrybuty) określające położenie miejsca, do którego ta informacja się odnosi.

Inne rodzaje geoinformacji o innym modelu struktury, np. dane typu TIN (*Triangular Irregular Network*) stwarzają znaczne trudności w ich przetwarzaniu, ponieważ są niestandardowe i formy ich zapisu bywają bardzo różne w różnych systemach, w których geoinformacje mogą być używane. Z tego względu jedynym sposobem wykorzystania takich danych jest ich konwersja do któregoś z wymienionych powyżej trzech kategorii.

Więcej szczegółowych zaleceń dotyczących metodyki zapisu tych trzech kategorii danych geoprzestrzennych w schematach warunków hydrogeologicznych przedstawiono w rozdziale 6.2.

6.1.2. Struktura organizacyjna zbiorów danych cyfrowych dla JCWPd

We wstępie rozdziału 6.1 zostało przedstawione zagadnienie przechowywania cyfrowych danych geoprzestrzennych w repozytorium. Podstawowym elementem struktury repozytorium jest zestaw zbiorów danych schematu warunków jednej JCWPd w określonej wersji (fig. 6.7). Zestaw zbiorów danych również ma złożoną hierarchiczną strukturę (fig. 2.13). Z tego względu przyjęcie jednakowej organizacji zbiorów jest w tym przypadku istotne. W ogólnym ujęciu dzieli się je na:

1. Zbiory danych źródłowych pochodzące z różnych baz danych, serii zbiorów danych i innych repozytoriów. Ogólnie zbiory te można podzielić na dane hydrogeologiczne i dane z innych dziedzin. Na dane składają się nie tylko wyniki pomiarów, obserwacji terenowych i wyniki

badzeń laboratoryjnych próbek, ale także dane przetworzone w ramach innych prac badawczych wykonanych wcześniej i dotyczących obszaru rozpatrywanej JCWPd. Przykładem mogą być dane z wykonanych wcześniej modeli przepływu wód lub innych obliczeń bilansowych lub zasobowych, np. dla głównych zbiorników wód podziemnych znajdujących się na obszarze rozpatrywanej JCWPd. Jeżeli pozyskane z innych źródeł dane nie spełniają elementarnych wymagań dotyczących formy zapisu omówionych w tym Informatorze, konieczne jest wykonanie wstępnej ich konwersji, ale jedynie w zakresie niezbędnym do spełnienia tych wymagań.

2. Zbiory danych przetworzonych w celu opracowania schematu warunków hydrogeologicznych JCWPd. W tym przypadku przetworzeniu podlegają, traktowane jako źródłowe, dane opisane powyżej. Do tej grupy nie zalicza się danych będących wynikami różnych analiz przestrzennych, w tym wyników oceny podatności na zanieczyszczenia i wyników symulacji na modelach przepływu. W kategorii tej wyróżnia się sześć głównych typów danych: modele budowy przestrzennej i zmienności parametrów, dane określające warunki brzegowe, dane o ograniczeniach środowiskowych, o zagrożeniach antropogenicznych oraz o ilości i jakości wody stanowiącej JCWPd. Przetworzeniem danych w tym przypadku jest utworzenie nowego zbioru, często innego typu pod względem formy, dotyczącego tego samego aspektu schematu warunków hydrogeologicznych. Przykładem zbioru przetworzonego jest zbiór typu pokrycie w formie macierzowej (*matrix coverage, grid coverage*) opisujący kształt powierzchni spagowej poziomu wodonośnego i utworzony przy pomocy procedury interpolacyjnej z nieregularnie rozproszonych danych punktowych pochodzących z bazy danych Bank HYDRO.
3. Zbiory danych zasobu cyfrowego specyfikacji, które powstały w wyniku przeprowadzenia analiz relacji przestrzennych, ocen podatności na zanieczyszczenia, symulacji przepływu na modelach, a także innych analiz na bazie zbiorów danych przetworzonych. Zgodnie z opisaną na początku rozdziału 6 zasadą ponownego (wielokrotnego) użycia (*reuse*), nie tylko wynik końcowy analizy przestrzennej ma użyteczną wartość, ale także wiele innych zbiorów danych utworzonych dla tej analizy lub w jej trakcie zawiera informacje przydatne do opracowania schematu warunków JCWPd. Nie dla wszystkich JCWPd i niekoniecznie w pierwszych wersjach schematów będą wykonane takie analizy i symulacje komputerowe. Z tego względu ta kategoria danych może w zestawie danych nie występować.
4. Zobrazowania danych należących do kategorii wymienionych wcześniej. Pod pojęciem zobrazowania, zgodnie z normą ISO 19117 (*Portrayal*), rozumie się obraz danych, najczęściej w postaci mapy z określonym sposobem odwzorowania. Może to być obraz w formie rastrowej w jednym z przyjętych powszechnie formatów grafiki rastrowej, jak np. GIF, PNG lub TIFF z oddzielnie zdefiniowaną georeferencją lub dedykowany do takich zastosowań GeoTIFF, który ma georeferencję wpisaną wewnątrz – w nagłówku pliku. Może to także być wysokiej jakości obraz w formie wektorowej zapisany w języku SVG, jednak zastosowanie tej formy zobrazowania jest ograniczone do danych w formie wektorowej. Poszczególne zbiory danych stanowiące zobrazowania mogą być przy użyciu odpowiednich przeglądarek łączone w bardziej złożone kompozycje wizualne. W takim przypadku zbiory składowe stanowią warstwy wizualne, a cała kompozycja może być traktowana jako mapa warstwowa. W zależności od potrzeb dowolne zbiory z wymienionych wcześniej grup mogą być zobrazowane i może to być wykorzystane do wizualnych analiz danych cyfrowych określonej JCWPd, co umożliwi pełniejsze zrozumienie złożonych schematów warunków hydrogeologicznych, a także, w konsekwencji, ich zweryfikowanie i wyeliminowanie potencjalnych sprzeczności pomiędzy informacjami zawartymi w poszczególnych zbiorach danych.

5. Oddzielne miejsce w strukturze zbiorów danych określonej JCWPd zajmują metadane. Zawierają one szczegółowe informacje o poszczególnych zbiorach danych i przez to pozwalają ustalić zawartość tych zbiorów bez potrzeby ich otwierania odpowiednimi programami komputerowymi. Metadane pełnią rolę porządkującą i organizacyjną. Bez nich trudno jest zarządzać dużym repozytorium zawierającym setki, a czasami nawet tysiące plików. Każdy zbiór danych jest opisany jednym rekordem metadanych w języku XML zgodnie z przyjętymi powszechnie standardami, w tym normami ISO 19115 i 19139. Przykład takiego rekordu jest przedstawiony w dodatku C. Poszczególne rekordy są opracowywane oddzielnie, jednak najczęściej grupę rekordów dotyczących jednego zagadnienia, w tym przypadku określonej JCWPd, zapisuje się w jednym pliku i taki plik jest często nazywany repozytorium metadanych.

Poszczególne elementy informacji zawarte w rekordzie metadanych można wpisywać ręcznie z uwzględnieniem wymaganej formy i, w wielu przypadkach, listy kodowej, jednak znacznie prościej i z uniknięciem błędów można to zrobić przy pomocy odpowiedniego edytora metadanych. Figura 6.11 przedstawia okno edytora metadanych Medard z otwartym plikiem przedstawionym w dodatku C.

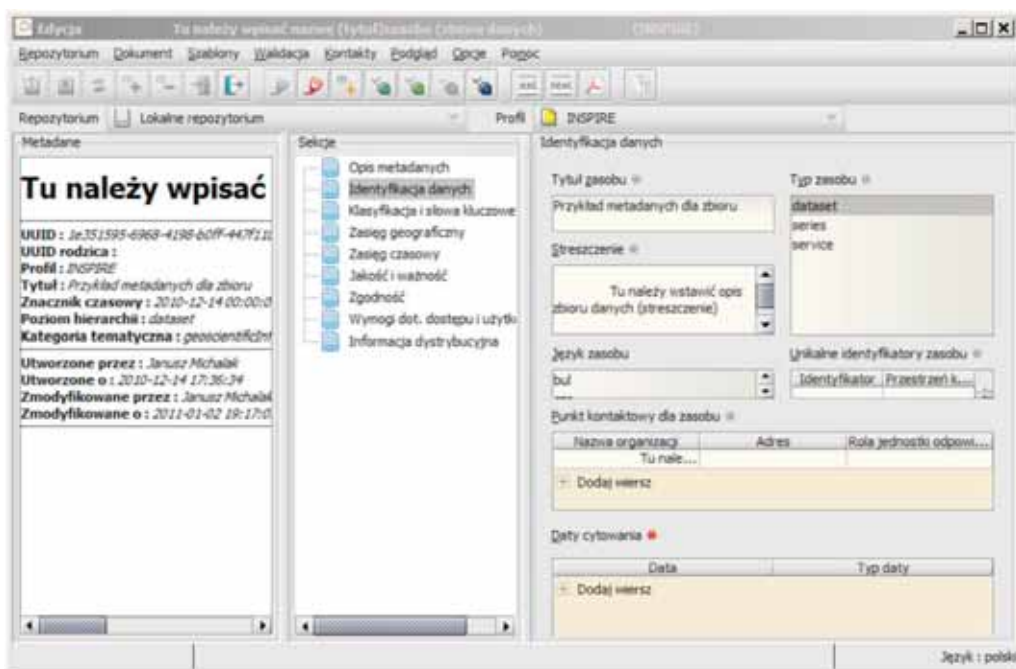


Fig. 6.11. Edytor metadanych Medard w trybie edycji rekordu metadanych przedstawionego w dodatku C

6.2. Metodyka zapisu danych w specyfikacjach warunków hydrogeologicznych

Z powodów przedstawionych w rozdziale 6.1.1, na obecnym etapie prac nad schematami warunków hydrogeologicznych JCWPd nie będzie zastosowany język GML, a jedynie tymczasowe inne formy zapisu danych przedstawione poniżej. Aby te zapisy mogły być później poprawnie przetransformowane do zapisu w języku GML, konieczne jest przestrzeganie kilku podstawowych zasad określonych w dalszej części tego rozdziału. Dokładniejsze i pełniejsze przedstawienie tych problemów i metod transformacji tak zapisanych danych do GML jest zawarte w monografii Michalaka (2010b).

6.2.1. Zapis danych typu pokrycie w formie macierzowej

Dane typu pokrycie w formie macierzowej (rastry numeryczne) o geometrii określonej w dalszej części opisu powinny być na potrzeby schematów warunków i modeli hydrogeologicznych zapisane w postaci tekstowej (często także niepoprawnie nazywanej formatem ASCII) o zdefiniowanej strukturze zapisu. Zaleca się stosowanie struktur powszechnie przyjętych ze względu na potrzebę przenoszenia takich danych pomiędzy różnymi systemami, zarówno geoinformatycznymi, jak i przeznaczonymi do modelowania przepływu wody podziemnej. Do najbardziej popularnych formatów tego typu należy ESRI ASCII Grid i GRASS ASCII Grid. Cechą charakterystyczną obu tych formatów, ułatwiającą ich wykorzystanie i wzajemną zamianę jest fakt, że dane stanowią dowolny ciąg liczb określony jako iloczyn liczby wierszy i liczby kolumn. Ciąg ten jest poprzedzony nagłówkiem definiującym siatkę i inne ogólne cechy zbioru. Chociaż nagłówki te w obu przypadkach są różne, to ich zamiana nie stwarza większego problemu. Ortoobrazy również należą do tej kategorii, ale ich rozdzielczość jest na ogół znacznie wyższa, niż rozdzielczość danych dla modeli. Z tego powodu stosuje się zapis binarny, dzięki któremu zyskuje się znacznie mniejszą objętość zapisu. Najbardziej odpowiednim formatem jest w tym przypadku GeoTIFF jako odmiana graficznego formatu TIFF z umieszczonymi wewnątrz w nagłówku danymi georeferencyjnymi. Gdy zastosowanie tego formatu nie jest możliwe, można użyć zwykłego formatu TIFF z podaniem danych georeferencyjnych w oddzielnym pliku z rozszerzeniem .tfw (*world file*) lub .aux.xml (*auxiliary metadata file*) w zależności od wersji oprogramowania. Aby ortoobraz mógł być przetwarzany przez system geoinformatyczny, jego pełny zapis powinien składać się z trzech plików:

- pliku z rozszerzeniem .tif, zawierającego ortoobraz w formacie TIFF;
- pliku georeferencyjnego z rozszerzeniem .tfw z danymi georeferencyjnymi, na których podstawie można wyliczyć współrzędne skrajnych narożnych pikseli ortoobrazu w przyjętym układzie odniesienia;
- pliku z rozszerzeniem .prj, definiującym przyjęty układ rozszerzenia, tak jak w formacie ESRI Shapefile opisanym poniżej.

Ze względu na częstą konieczność przetwarzania tych danych łącznie z danymi macierzowymi wskazane jest, aby dane ortoobrazowe miały geometrię zdefiniowaną na bazie geometrii danych macierzowych, np. poprzez wielokrotne zagęszczenie siatki podstawowej o gęstości 500 m.

6.2.2. Zapis danych typu wyróżnienie w formie wektorowej

Jako tymczasowy format zastępczy dla wyróżnień z reprezentacją wektorową proponuje się stosowanie powszechnie znanego formatu ESRI Shapefile. Zbiór danych w tym formacie składa się z kilku plików, wśród których najważniejsze są trzy:

- z rozszerzeniem .shp, zawierający binarny zapis geometrii w przyjętym układzie odniesienia, który jest zdefiniowany w pliku z rozszerzeniem .prj; jeden zbiór danych może zawierać tylko jeden typ geometrii: obszary, linie lub punkty;
- z rozszerzeniem .dbf, zawierający tabelę danych atrybutowych zapisanych binarnie w formacie bardzo prostej bazy relacyjnej *dBASE*;
- plik z rozszerzeniem .prj, definiujący układ odniesienia; dla przyjętego w schematach warunków hydrogeologicznych JCWPd układu ETRS89/Poland CS92 poprawny zapis treści tego pliku jest podany w dodatku B.2.

6.2.3. Zapis danych tekstowych z odniesieniem geoprzestrzennym

Aby dane typu tekstowego, w tym tabelaryczne, a także atrybuty w plikach formatu *dBASE* dla danych w formie wektorowej ESRI Shapefile, mogły być poprawnie zastosowane, muszą spełniać zalecenia dotyczące ich zapisu:

1. Kodowanie polskich znaków diakrytycznych – wymagane jest, aby w każdym przypadku sposób kodowania był określony. Połączenie zbiorów o różnych nieokreślonych sposobach kodowania powoduje, że zbiory te są bezużyteczne. Zalecane kodowanie to: UTF-8, ISO 8859-2. Nie zaleca się stosowania m.in. kodu Windows-1250. Na figurze 6.12 widoczny jest skutek nieodpowiedniego sposobu kodowania znaków diakrytycznych (nie podano, jaki kod zastosowano). Opisy na mapie są z tego powodu nieczytelne.
2. Zapis liczb zmiennoprzecinkowych – separator dziesiętny w postaci kropki (., .”), a nie przecinka (., ,”) – takie wymagania ma zdecydowana większość programów i systemów (w tym geoinformatycznych). Jeżeli zastosowanie określonego oprogramowania wymaga użycia przecinka jako separatora, można to przyjąć, jednak należy to w opisie uzasadnić i stworzyć możliwość zamiany przecinka na kropkę.
3. Zapis współrzędnych geograficznych (długość i szerokość) – stosowane są dwa sposoby: DMS – stopień–minuta–sekunda (*Degree–Minute–Second*) i DD – stopień dziesiętny (*Decimal Degree*). Pierwszy sposób jest znacznie bardziej kłopotliwy przy przetwarzaniu, szczególnie gdy stosuje się różne separatory (., °, ', " lub „:”, lub „–”). W drugim przypadku trzeba pamiętać, aby separatorem dziesiętnym była kropka.

Oddzielną kategorię zbiorów danych geoprzestrzennych stosowanych w opracowywaniu schematów warunków hydrogeologicznych stanowią dane tabelaryczne. Ta forma jest najczęściej stosowana w przypadku danych z punktowym odniesieniem przestrzennym, np. wierceń, studni i innych punktów badawczych, których położenie jest określane przy pomocy tylko dwóch współrzędnych w przyjętym układzie odniesienia. Najprostszym i jednocześnie najbardziej uniwersalnym sposobem zapisu takich danych jest zwykły niesformatowany tekst o określonym sposobie kodowania znaków (przykład 6.4), zapisany w pliku o płaskiej strukturze z rozszerzeniem .txt. Zwykły tekst jest to zapis w pliku znaków wyłącznie zgodnie z przyjętym sposobem kodowania (na przykład ASCII lub UTF-8), tzn. bez żadnych dodatków formatujących tekst lub okreś-

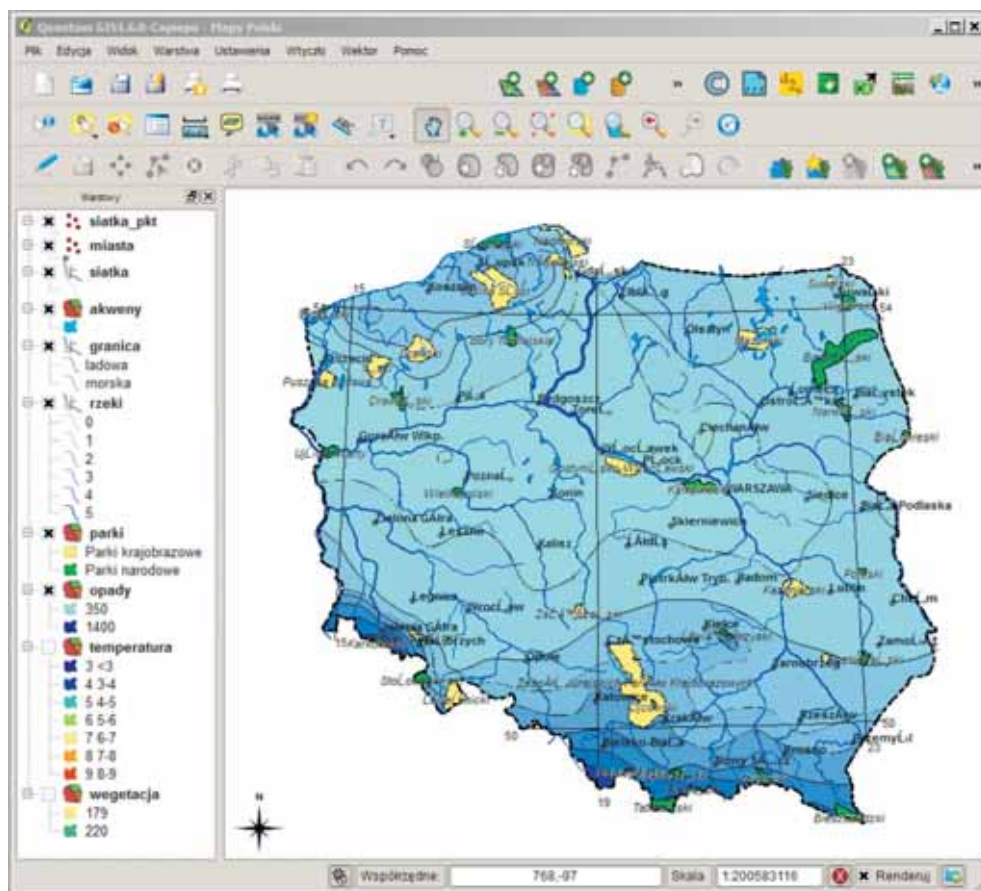


Fig. 6.12. Okno systemu Quantum GIS, przedstawiające mapę zmienności przestrzennej średnich wieloletnich rocznych opadów atmosferycznych (Pedros Iol, 2010)

Przykład 6.4. Dane tabelaryczne z geoprzestrzennym odniesieniem punktowym zapisane w formie zwykłego tekstu, w którym poszczególne pola są oddzielone znakami tabulacji, a linie kończą się znakami EOL

```
x:(układ-92) → y:(układ-92) → pobór-średni-dobowy.[m3]-l → zasoby-ekspl.[m3/d]
642587.781 → 477300.341 → 6 → 864↵
665804.161 → 510947.357 → 7 → 816↵
640126.183 → 515762.352 → 13 → 1200↵
633140.158 → 506424.671 → 14 → 1080↵
654986.557 → 509091.520 → 24 → 1320↵
640528.592 → 519674.148 → 25 → 1224↵
647483.754 → 495830.461 → 20 → 960↵
638840.028 → 515002.181 → 28 → 1296↵
638773.581 → 512648.810 → 9 → 348↵
```

Tabela 6.2

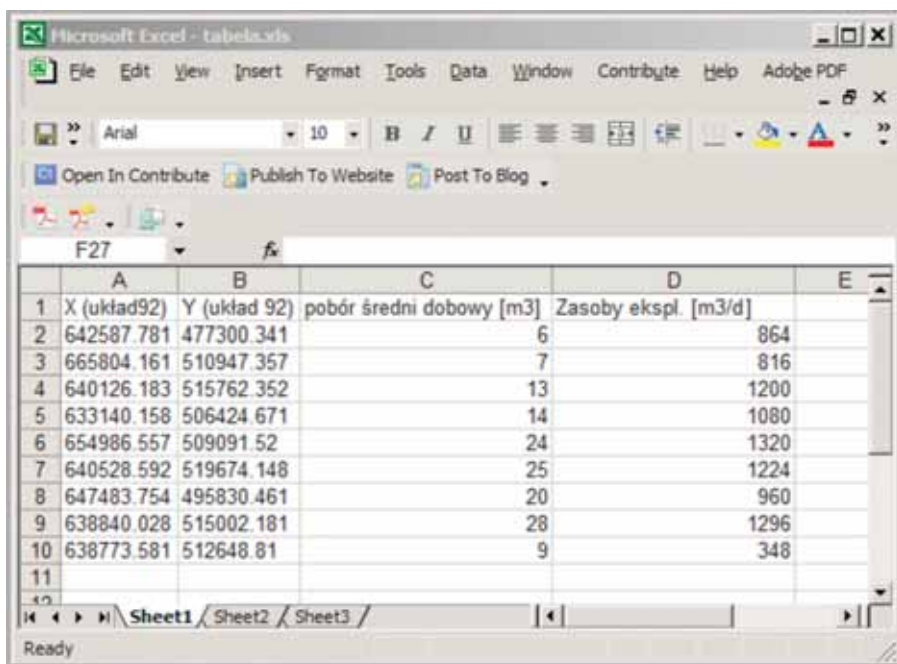
Edytor tekstu MS Word pozwala na zapisanie danych przedstawionych w przykładzie 6.3 w formie tabeli, która przy pomocy tego edytora może być przekształcona do zwykłego płaskiego tekstu

X (układ 92)	Y (układ 92)	Pobór średni dobowy [m ³]	Zasoby eksploatacyjne [m ³ /d]
642587.781	477300.341	6	864
665804.161	510947.357	7	816
640126.183	515762.352	13	1200
633140.158	506424.671	14	1080
654986.557	509091.52	24	1320
640528.592	519674.148	25	1224
647483.754	495830.461	20	960
638840.028	515002.181	28	1296
638773.581	512648.81	9	348

lających atrybuty poszczególnych znaków lub ich grup (np. krój lub kolor). Tekst płaski lub plik płaski zawierający tekst składa się z ciągów znaków stanowiących linie zakończone znakiem (lub znakami) EOL (*end of line*) i kończy się znakiem (lub znakami) EOF (*end of file*). W językach znacznikowych (HTML i aplikacje XML, w tym GML) surowy zapis podlega tym samym zasadom, lecz jego interpretacja zależy od znaczników, które mogą nadać zapisowi formę strukturalną, często bardzo złożoną, hierarchicznie zagnieżdżoną, z różnorodnymi powiązaniem. Aby jednak taka forma danych mogła być przyjęta przez większość programów, konieczne jest spełnienie warunków przedstawionych powyżej.

Dane przedstawione w przykładzie 6.4 można utworzyć przy pomocy edytora tekstu MS Word poprzez zapisanie ich początkowo w tabeli (tab. 6.2), a następnie konwersję przy pomocy tego edytora na zwykły tekst i zapisanie w formacie płaskiego tekstu z rozszerzeniem .txt. Można to również wykonać przy pomocy arkusza kalkulacyjnego MS Excel (fig. 6.13). W obu przypadkach należy zadbać, aby separatorem w liczbach dziesiętnych była kropka, a nie przecinek, jak to jest stosowane w oprogramowaniu powszechnego użytku.

W wielu przypadkach istotne znaczenie ma sposób kodowania znaków tekstowych wykraczających poza 7-bitowy kod ASCII. Gdy dane mają być w przyszłości przeniesione do zapisu w języku znacznikowym XML (np. GML), konieczne jest zastosowanie kodowania Unicode UTF-8. Większość edytorów, w tym najprostszy edytor MS Notatnik (*MS Notepad*), pozwala na wybór sposobu kodowania, także na wybór kodu UTF-8 (fig. 6.14).



	A	B	C	D	E
1	X (układ 92)	Y (układ 92)	pobór średni dobowy [m3]	Zasoby eksplo. [m3/d]	
2	642587.781	477300.341	6	864	
3	665804.161	510947.357	7	816	
4	640126.183	515762.352	13	1200	
5	633140.158	506424.671	14	1080	
6	654986.557	509091.52	24	1320	
7	640528.592	519674.148	25	1224	
8	647483.754	495830.461	20	960	
9	638840.028	515002.181	28	1296	
10	638773.581	512648.81	9	348	
11					

Fig. 6.13. Okno arkusza kalkulacyjnego MS Excel z zapisanymi danymi tabelarycznymi z przykładu 6.4

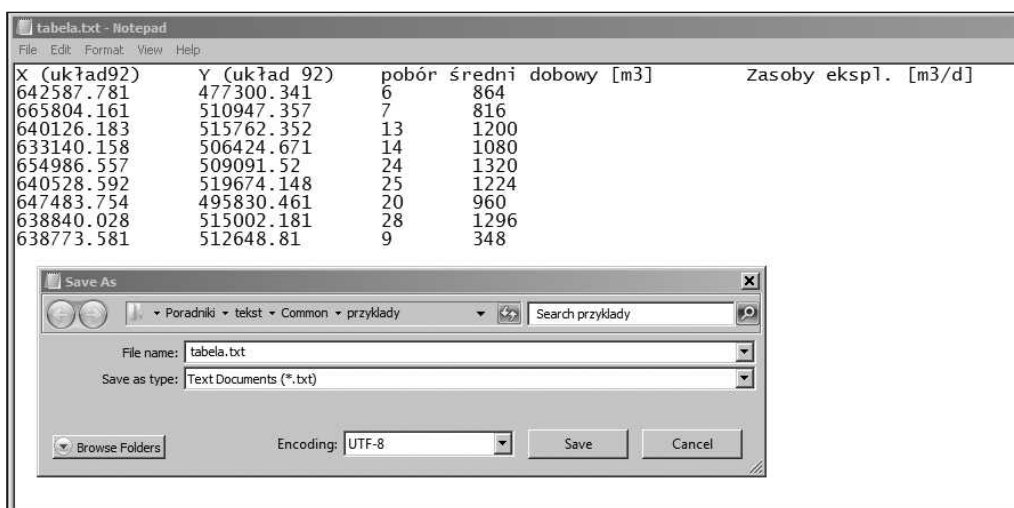


Fig. 6.14. Zapis danych tabelarycznych w postaci zwykłego płaskiego tekstu z wybranym kodowaniem Unicode UTF-8

6.2.4. Definicje siatek dla danych typu pokrycie w formie macierzowej

W celu umożliwienia integracji i harmonizacji danych związanych z różnymi schematami warunków i modelami przepływu, konieczne jest zdefiniowanie wspólnego systemu siatek teselacji i dyskretyzacji przestrzennej, opartego na przyjętych w Polsce i Unii Europejskiej standardach. Przyjmuje się, że ze względu na wymagania systemów geoinformatycznych (typu GIS) niezbędnych do przetwarzania (łączenia i selekcjonowania) danych, wszystkie dane w formie macierzowej (rastrów numerycznych) będą miały siatkę kwadratową. Ta sama zasada dotyczy ortoobrazów. Przeanalizowanie wielu modeli tego rodzaju prowadzi do wniosku, że podstawową gęstością siatki dyskretyzacji jest $\Delta x = \Delta y = 500$ m. Taka gęstość jest kompromisem pomiędzy wymaganiami stawianymi dla modeli o charakterze regionalnym. Do modeli takich zalicza się schematy warunków i modele JCWPd, a także wiele innych modeli do oceny warunków GZWP i do wyznaczania zasobów dyspozycyjnych. Jest to optymalny wymiar dla zdecydowanej większości modeli o charakterze regionalnym, ponieważ liczba danych nie jest wygórowana, a dostatecznie szczegółowo opisuje zmienność przestrzenną warunków hydrogeologicznych modelowanej jednostki. Obszar Polski zamyka się w prostokącie o wymiarach 649 km (północ–południe) i 689 km (wschód–zachód), co dla siatki o $\Delta x = \Delta y = 0,5$ km daje geometrię pokrycia w formie macierzowej 1298 wierszy i 1378 kolumn zawierających 1 788 644 komórki (bloki). Przybliżone wymiary obszarów największych JCWPd są rzędu 130×130 km, co przekłada się na macierz $260 \times 260 = 67\,600$ komórek. Dla analiz szczegółowych dotyczących warunków hydrogeologicznych w skali regionalnej takie parametry są w większości przypadków optymalne.

W pewnych sytuacjach jednak potrzebne są zestawy danych o siatce bardziej gęstej. Dotyczy to rejonów o skomplikowanych warunkach hydrogeologicznych, także w wielu przypadkach ośrodka szczelinowo-porowego lub pierwszego poziomu wodonośnego silnie powiązanego z wodami powierzchniowymi o dużej gęstości i złożoności sieci hydrograficznej. Należy też spodziewać się przypadków dokonywania analiz przestrzennych dla więcej niż jednej JCWPd lub jednego GZWP, a także potrzeby wykonania wspólnej analizy wyników z więcej niż jednego modelu. W takich sytuacjach może być potrzebna siatka o gęstości mniejszej, niż gęstość podstawowa (500 m).

W obu przypadkach – siatki mniej i bardziej gęstej – konieczne jest zagwarantowanie możliwości przeliczenia (transformacji) wszystkich danych do siatki podstawowej, a także w kierunku przeciwnym. Trzeba jednak pamiętać, że transformacje takie nie należą do kategorii przetwarzania odwracalnego. Wykonanie transformacji w jednym kierunku i następnie przetransformowanie wyników ponownie do siatki wyjściowej nie da takich samych danych. W takim procesie nastąpi strata dokładności i w szczególnych przypadkach wynikowe dane mogą okazać się obciążone tak dużymi błędami, że będą bezużyteczne.

Przestrzenną zgodność siatek o różnej gęstości, umożliwiającą względnie proste transformowanie danych, można uzyskać przez zagęszczenie linii siatki i w konsekwencji zagęszczenie jej węzłów tak, aby linie i węzły siatki mniej gęstej stanowiły jednocześnie linie i węzły siatki bardziej gęstej. Dwa sposoby takiego zagęszczenia siatki są przedstawione na figurach 6.15 i 6.16. Pierwszy sposób dotyczy zagęszczenia z modulem 3 – każdy blok jako otoczenie węzła jest dzielony na 9 mniejszych bloków z zachowaniem zgodności zarówno węzłów, jak i granic bloków. W drugim przypadku siatka jest zagęszczana z modulem 2, co sprawia, że jest zachowana pełna zgodność węzłów, jednak granice bloków siatki grubszej są dla siatki bardziej gęstej jej liniami. W takim przypadku wszystkie granice bloków siatki bardziej gęstej są nowymi elementami geometrycznymi.

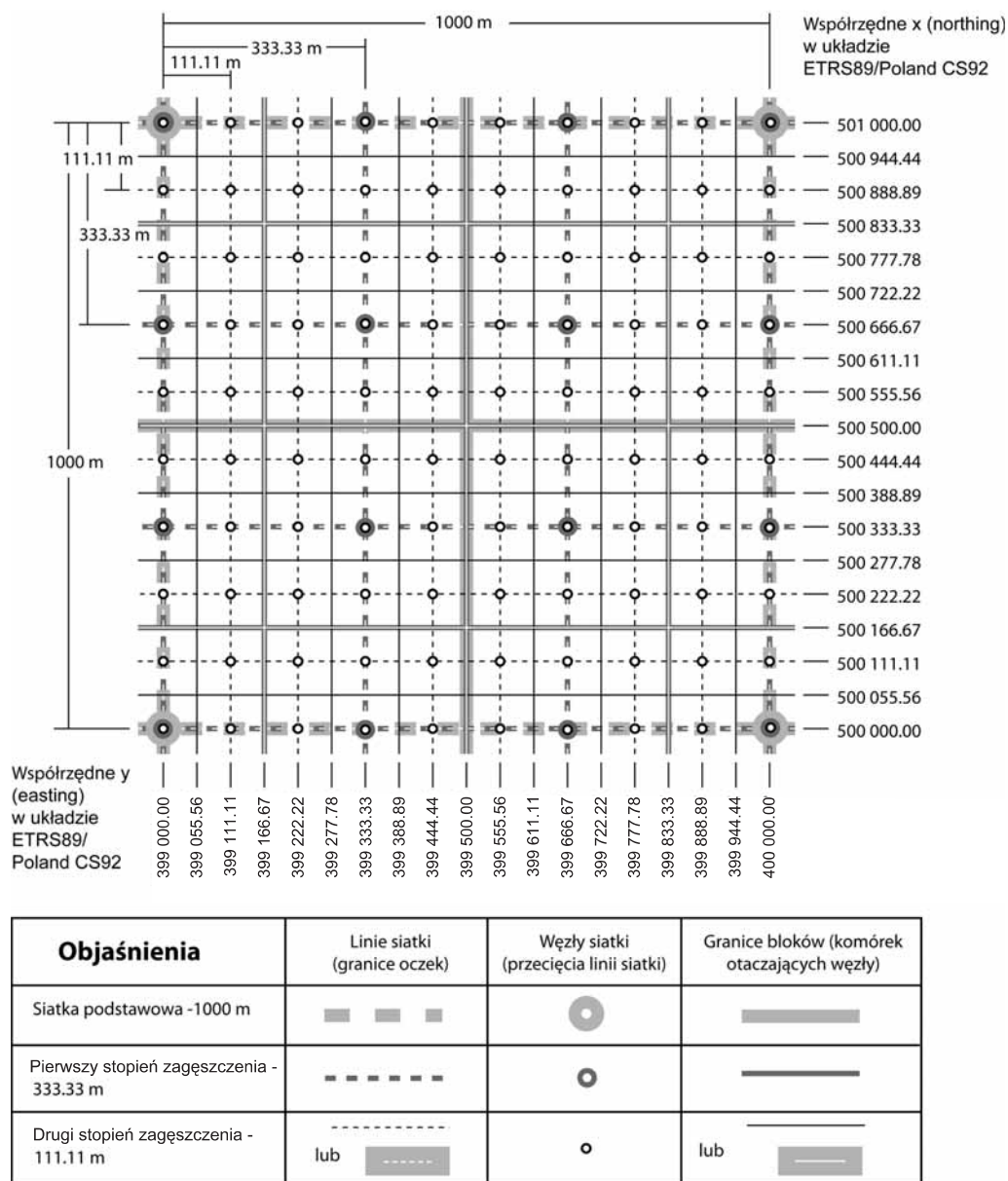


Fig. 6.15. Dwustopniowe zagęszczanie siatki bloków kwadratowych z modulem 3 (zagęszczanie trójkrotne) dla danych i modeli

Wartości współrzędnych elementów siatek w układzie ETRS89/Poland CS92 są przykładowe

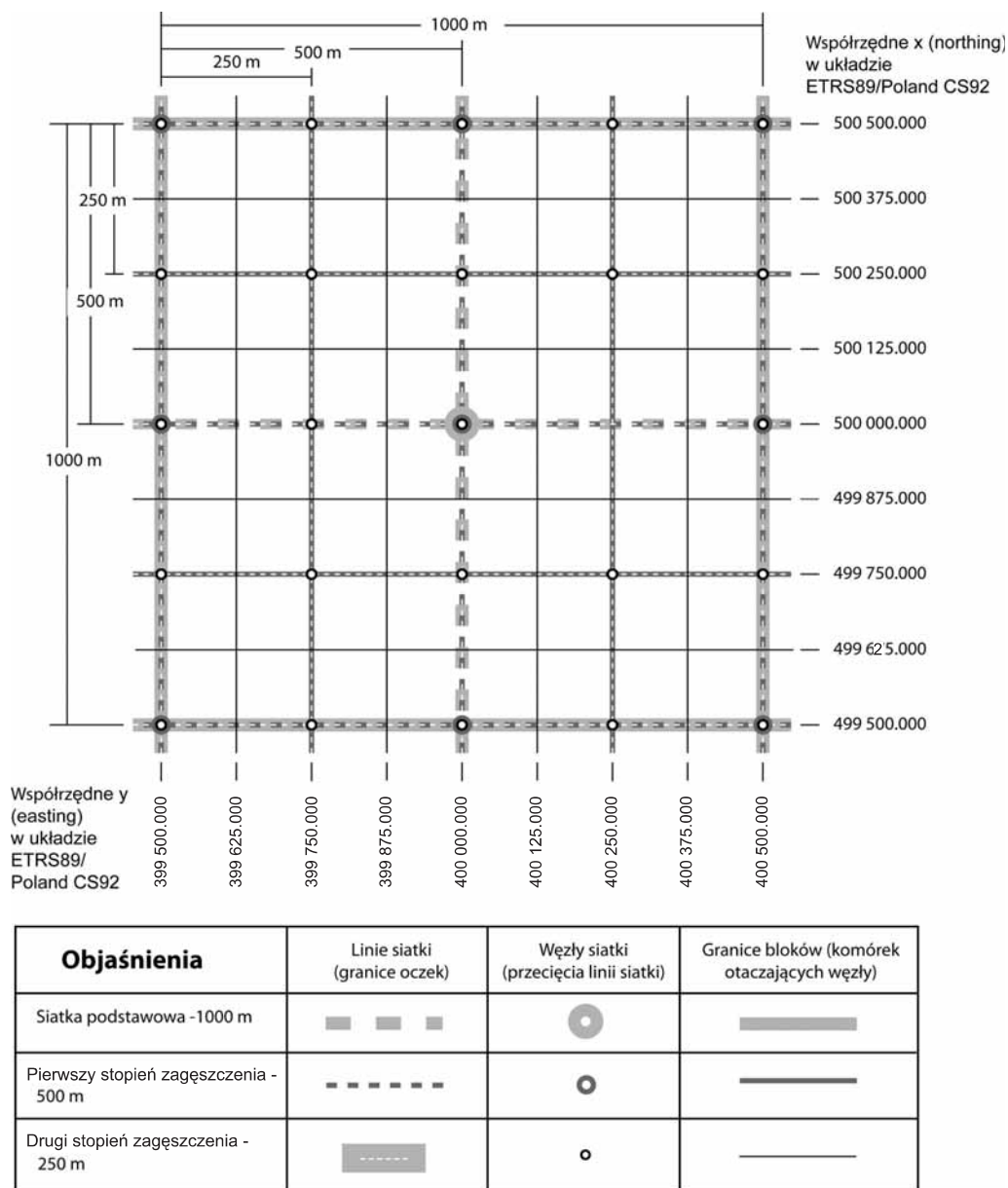


Fig. 6.16. Dwustopniowe zagęszczanie siatki bloków kwadratowych z modulem 2 (zagęszczanie dwukrotne)

Wartości współrzędnych elementów siatek w układzie ETRS89/Poland CS92 są przykładowe

Przy podziale z modulem 3 skok pomiędzy blokami jest duży – dla podstawowej siatki 1000 m przyjętej w specyfikacji siatek INSPIRE, siatka bardziej szczegółowa podziału pierwszego stopnia ma wymiar 333,33 m, a podziału drugiego stopnia – 111,11 m (fig. 6.15).

Przy podziale z modulem 2 każdy blok siatki bardziej ogólnej zawiera w sobie jeden pełny blok, cztery połówki i cztery ćwiartki bloków siatki bardziej szczegółowej. W rezultacie boki bloków siatek o różnych stopniach szczegółowości nie mają wspólnych granic. Skok podziału jest umiarkowany – dla podstawowej siatki 500 m, siatka bardziej ogólna ma wymiar 1000 m, a bardziej szczegółowa – 250 m (fig. 6.16).

Powyższe sposoby zagęszczania kwadratowej siatki bloków mają różne właściwości i różną dokładność transformacji poszczególnych rodzajów danych macierzowych, ponieważ algorytmy transformacji są różne. Wybór jednego z nich zależy od specyfiki konkretnego modelu, a także od narzędzi geoinformatycznych, jakie mogą być zastosowane. Z tego powodu wykonawcy konkretnego modelu powinni zdecydować, który ze sposobów jest w tym przypadku najbardziej odpowiedni.

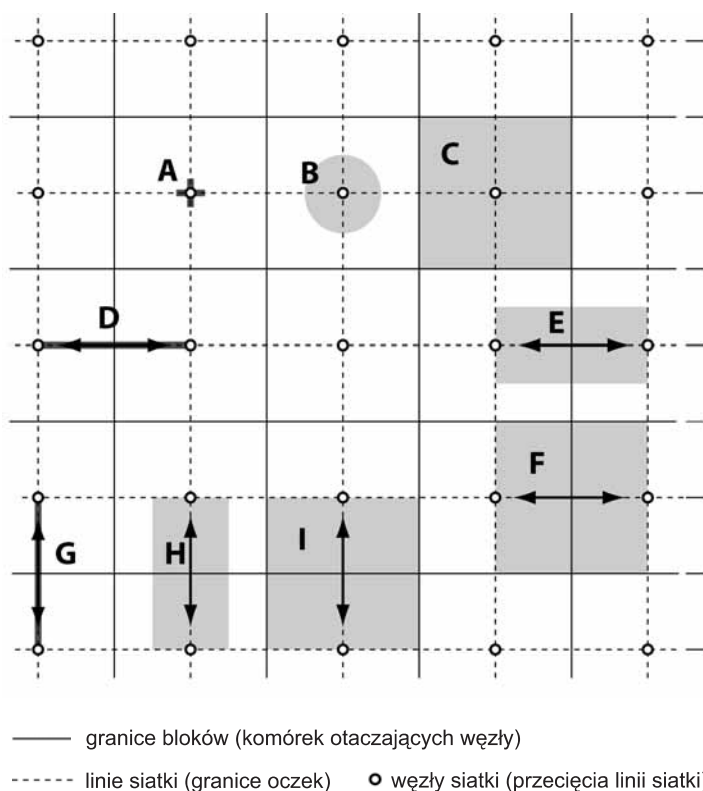


Fig. 6.17. Schemat przyporządkowania atrybutów tematycznych elementom siatki: punktom węzłów, najbliższemu otoczeniu tych punktów, blokom otaczającym węzły, odcinkom łączącym węzły, najbliższemu otoczeniu tych odcinków lub połówkom bloków przyległych do tych odcinków

Na figurach 6.15 i 6.16 podano przykład współrzędnych węzłów i bloków w układzie ETRS89/Poland CS92. Główne węzły siatki o kroku 1000 m są w obu przypadkach, zgodnie z wymaganiami specyfikacji INSPIRE, określone współrzędnymi wyrażonymi w pełnych kilometrach.

Dodatkowym istotnym wymaganiem jest odpowiednie i wyraźnie określone przypisywanie wartości atrybutów tematycznych poszczególnym elementom siatek. Atrybutami tymi w przypadku specyfikacji warunków hydrogeologicznych mogą być parametry fizyczne lub geometryczne wodonośca, stan systemu hydrogeologicznego wyrażony wysokościami hydraulicznymi lub parametrami określającymi przepływ bądź wiele innych wielkości fizycznych określających oddziaływanie czynników zewnętrznych na system hydrogeologiczny. Sposobami przypisywania poszczególnych atrybutów są (fig. 6.17):

- przypisanie atrybutu dokładnie do punktu węzłowego (A),
- przypisanie atrybutu otoczenia punktu węzłowego (B),
- przypisanie atrybutu do całego bloku otaczającego punkt węzłowy (C),
- przypisanie atrybutu dokładnie do odcinka międzywęzłowego na kierunku W–E (D),
- przypisanie atrybutu do otoczenia odcinka międzywęzłowego na kierunku W–E (E),
- przypisanie atrybutu do dwóch połówek sąsiednich bloków otaczających odcinek międzywęzłowy na kierunku W–E (F),
- przypisanie atrybutu dokładnie do odcinka międzywęzłowego na kierunku S–N (G),
- przypisanie atrybutu do otoczenia odcinka międzywęzłowego na kierunku S–N (H),
- przypisanie atrybutu do dwóch połówek sąsiednich bloków otaczających odcinek międzywęzłowy na kierunku S–N (I).

6.3. Oprogramowanie do przetwarzania danych przestrzennych dla modeli

Pozyskiwanie, przetwarzanie, przechowywanie i udostępnianie danych geoprzestrzennych dotyczących JCWPd, a także ich analiza, wymagają zastosowania wielu różnych wyspecjalizowanych systemów geoinformatycznych. Ogólny przegląd tych systemów jest głównym tematem niniejszego rozdziału. Można je podzielić według czterech kryteriów:

1. Pod względem przeznaczenia (funkcji pełnionej w środowisku):

- Systemy typu stacja robocza (*workstation*), często nazywane *desktop*; takie oprogramowanie jest popularnie nazywane systemami GIS (*Geographic Information System*). Typowymi przedstawicielami tej grupy są: ArcGIS, GIS GRASS, Quantum GIS i GeoMedia.
- Systemy dedykowane węzłom infrastruktury geoinformacyjnej w roli geoserwerów. Systemy te realizują usługi za pośrednictwem sieci internetowej, zdefiniowane w specyfikacjach WMS (*Web Map Service*), WMTS (*Web Map Tile Service*), WFS (*Web Feature Service*), WFS-T (*Web Feature Service Transactional*), WCS (*Web Coverage Service*), WCPS (*Web Coverage Processing Service*), WCS-T (*Web Coverage Service Transactional*), WPS (*Web Processing Service*) i WSC (*Web Service Common*). Przedstawienie bardziej szczegółowe wszystkich tych specyfikacji usług wykracza poza tematykę Informatora i są one jedynie krótko opisane we wstępie rozdziału 7. Do tej grupy należą m.in.: ArcGIS Server firmy ESRI, GeoMedia SDI firmy Intergraph, a także, w kategorii otwartego oprogramowania, GeoServer i MapServer.

- Systemy klienckie infrastruktury geoinformacyjnej – oprogramowanie, którego zadaniem jest umożliwienie użytkownikom infrastruktury wyszukiwania, przeglądania i pobierania danych geoprzestrzennych udostępnianych przez węzły infrastruktury. Większość zaawansowanych systemów GIS ma obecnie interfejsy sieciowe, umożliwiające komunikowanie się z węzłami infrastruktury, i przez to realizowanie wymienionych powyżej operacji. Do tej kategorii należą przeglądarki map i danych geoprzestrzennych; przedstawicielami tej grupy są ArcGIS Explorer firmy ESRI i GeoMedia Viewer firmy Intergraph. Na szczególną uwagę zasługują programy Gaia firmy Carbon Project, spełniający wiele standardów oraz GML Viewer firmy Snowflake Software, w którym istnieje możliwość pełnej obsługi języka GML w wersji 3.2.1 i szeregu jego aplikacji.
- Systemy wyspecjalizowane do określonych nietypowych zadań nie realizowanych przez systemy powszechnie stosowane np. typu GIS. Do nietypowych zadań zalicza się wyszukiwanie zbiorów i usług sieciowych na podstawie serwerów katalogowych zawierających zbiory metadanych, edycję metadanych, a także transformację zbiorów danych pomiędzy różnymi formatami zapisu, modelami danych i układami odniesienia przestrzennego z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania. Do tej grupy należą: serwer katalogowy GeoNetwork jako oprogramowanie otwarte, edytor metadanych Medard oraz, zasługujący na szczególną uwagę ze względu na duże możliwości, system FME (*Feature Manipulation Engine*) firmy Safe Software jako oprogramowanie do transformacji danych.

2. Pod względem zaawansowania technologicznego:

- tradycyjne – oparte na technologiach informatycznych lat 80., np. ArcInfo, GRASS, MGE;
- dojrzałe – oparte na nowych technologiach, w tym z zakresu obiektowości i rozproszenie, np.: Gothic, SmallWorld i Quantum GIS;
- najnowsze – często w trakcie wstępnego rozwoju lub na etapie eksperymentów praktycznych; do tej kategorii należą projekty otwartego oprogramowania, np.: GeoViewer opracowywany w środowisku GeoExt w ramach projektu INSPIRE-FOSS (*Free and Open Source Software*) i system DeeGree 3, związany z projektem Deegree InspireNode.

3. Pod względem otwartości:

- komercyjne zamknięte – użytkownik może posługiwać się jedynie dostępnym dla niego interfejsem, a wewnątrz jest „tajemnicą” producenta;
- komercyjne otwarte – w przeciwieństwie do poprzednich, jest możliwość powiązania innych systemów lub modułów rozwiązywania zadań, których dany system nie obsługuje;
- otwarte – prawie wyłącznie niekomercyjne, dla których jest dostępny kod źródłowy, pozwalający na dostosowanie ich do specyficznych zadań i rozbudowy o funkcje, których nie posiada.

4. Pod względem platformy sprzętowo-systemowej:

- przeznaczone do komputerów personalnych i oparte o środowisko MS Windows, np. w kategorii systemów GIS: MGE, GeoMedia, MapInfo;
- oparte na systemie operacyjnym typu Unix, w tym różnych odmianach Linuxa, ale funkcjonujące także w środowisku MS Windows – serwery geoinformacyjne i stacje robocze, np. GRASS, MapServer i wiele programów w języku Java;
- heterogeniczne – poszczególne fragmenty systemu rozproszonego mogą być oparte na różnych platformach.

6.3.1. Przegląd systemów typu GIS

Obecnie istnieje tendencja do zacierania się różnic pomiędzy systemami GIS wyspecjalizowanymi w kierunku informacji geoprzestrzennej a systemami ogólnoinformatycznymi. Przyczyną tego jest rozwój technologii interoperacyjnych, ale przede wszystkim fakt, że ponad 80% wszelkich informacji ma aspekt przestrzenny. W rezultacie system zarządzania bazą danych, np. komercyjny Oracle Spatial lub otwarty PostgreSQL z rozszerzeniem PostGIS w powiązaniu z prostą aplikacją do obróbki i analizy danych geoprzestrzennych, może stanowić system geoinformacyjny. Szybki rozwój technologicznych standardów rozwijanych w OGC (*Open Geospatial Consortium*) i w Komitecie Technicznym ISO/TC211 sprawia, że nowo opracowywane rozwiązania programistyczne dostosowane do tych standardów mają zdecydowaną przewagę nad monolitycznymi systemami tradycyjnymi. Jednak biorąc pod uwagę potrzeby technologiczne w tym zakresie, jakie wynikają z charakteru danych geoprzestrzennych określających schematy warunków hydrogeologicznych JCWPd i popularność niektórych systemów GIS w społeczności hydrogeologów zajmujących się tą problematyką, proponuje się tu cztery wybrane. Są to dwa systemy komercyjne – ArcGIS firmy ESRI i GeoMedia Professional firmy Intergraph oraz dwa systemy typu otwartego (*Open Source*) – GIS GRASS i Quantum GIS. W przypadku potrzeby przeprowadzania skomplikowanych transformacji danych z jednego modelu do innego niezbędne jest zastosowanie mało znanego w Polsce systemu FME kanadyjskiej firmy Safe Software. Na dokładniejsze przedstawienie zasługują trzy systemy: komercyjny ArcGIS firmy ESRI, a także GIS GRASS i Quantum GIS. Dwa ostatnie są rozwijane w środowiskach akademickich jako otwarte projekty OSGeo (*Open Source Geospatial Foundation*).

W starszych wersjach system ArcGIS był podzielony na części: ArcInfo – dla zadań bardziej złożonych i ArcView – zadań prostych. Systemy te są najbardziej znane i przez to najbardziej rozpowszechnione na świecie, a jednocześnie są zaawansowane technologicznie, uniwersalne i złożone z wielu modułów przeznaczonych do różnych specjalistycznych zadań. Podstawowe założenia systemu ArcInfo (głównego składnika systemu ArcGIS) opracowano w latach 80. i początkowo językiem, w którym był zapisany kod tego oprogramowania, był Fortran. Język ten jest oparty na koncepcjach informatycznych lat 70. i z tego względu podstawowa koncepcja systemu jest już raczej przestarzała, lecz ciągłe prace nad rozbudową i unowocześnianiem tego systemu sprawiły, że odgrywa on dominującą rolę na rynku systemów GIS. W zastosowaniach będących przedmiotem tego Informatora ważne jest, aby system ArcGIS był uzupełniony dwoma dodatkowymi modułami. Pierwszy to *Data Interoperability*, przeznaczony do konwersji danych pomiędzy różnymi formatami. Jest to uproszczona i znacznie ograniczona w swoich możliwościach wersja systemu FME. Drugi – *Spatial Analyst*, pozwala na zamianę danych z formy wektorowej na macierzową (rastrową) i wiele różnorodnych operacji na takich danych, również z zakresu algebry map. Figura 6.18 przedstawia okno tego programu podczas analizy danych hydrogeologicznych dla wyznaczenia zasobów dyspozycyjnych.

System GRASS (fig. 6.19) jest systemem młodszym od ArcInfo. Został opracowany na potrzeby wojskowe w ośrodku badawczym armii amerykańskiej CERL (*Construction Engineering Research Laboratory*), ponieważ inne systemy GIS w tym czasie nie spełniały wymagań stawianych systemom stosowanym w wojsku USA. Od początku był opracowywany w języku programowania C i przez to jego założenia architektoniczne są stosunkowo nowe. Od początku miał status *public domain* – jego kod źródłowy jest dla wszystkich dostępny. Obecnie prace nad rozwojem tego systemu są prowadzone w ramach projektu koordynowanego przez OSGeo. Pod względem stopnia złożoności i uniwersalności dorównuje najbardziej zaawansowanym systemom komercyjnym, jednak jego najważniejszą zaletą jest dostępność kodu źródłowego. Dzięki temu poprzez

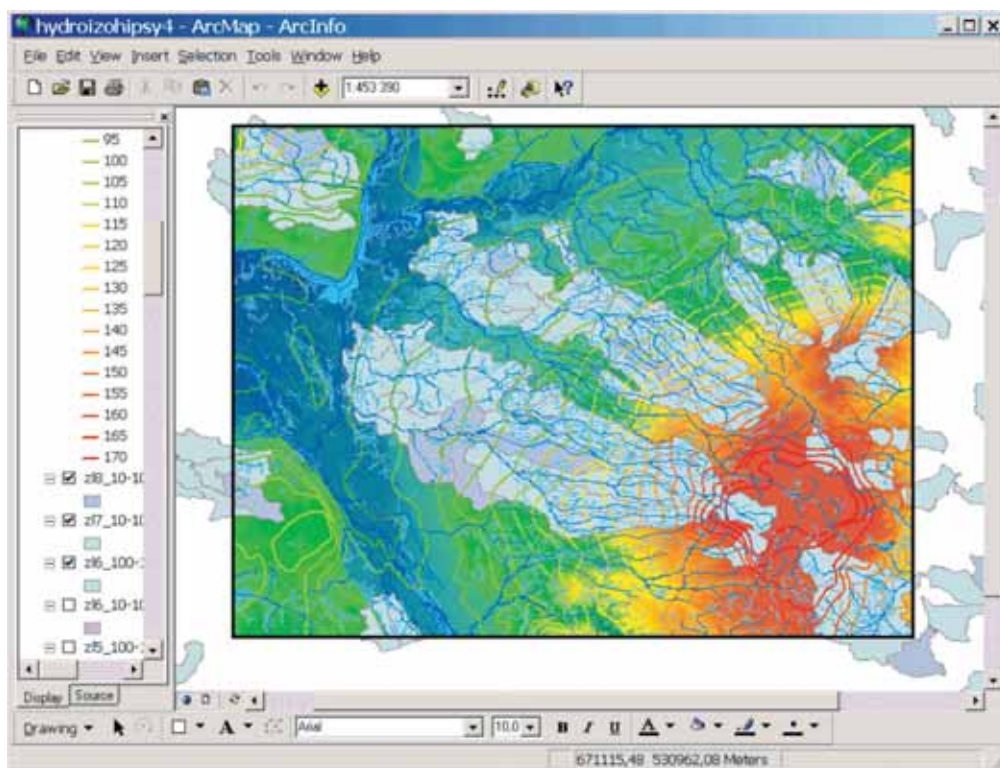


Fig. 6.18. Okno systemu ArcGIS przedstawiające zobrazowanie danych hydrogeologicznych w pracach nad wyznaczeniem zasobów dyspozycyjnych

modyfikowanie kodu i dopisywanie nowych procedur i modułów można go dostosować do bardzo złożonych i nietypowych zadań. Ta właściwość systemu GRASS predysponuje go do zastosowań w pracach eksperymentalnych i naukowych. Przykładami takiego rozszerzenia systemu GRASS są jego moduły przeznaczone do budowy modeli przepływu wód podziemnych:

- `r.gmtg` – moduł integrujący system MODFLOW z systemem GRASS (Carrera-Hernández, Gaskin, 2006),
- `r.gwflow` i `r3.gwflow` – samodzielne moduły systemu GRASS przeznaczone do symulacji przepływu wody w 2D i 3D (Gebbert, 2007),
- system Aspar – biblioteka klas języka C++ do budowy modeli przepływu 2,5D w środowisku systemu GRASS (Michalak, 1997).

Stosunkowo niedawno system GRASS mógł funkcjonować jedynie w środowisku platformy systemowej Unix, w tym także Linux. Opracowanie wersji pracującej w środowisku MS Windows znacznie rozszerza krąg jego potencjalnych użytkowników i dzięki temu staje się powszechnym narzędziem do przetwarzania geoinformacji także w Polsce. Trzeba jednak podkreślić, że wysoki stopień zaawansowania tego systemu wymaga od użytkownika większej wiedzy, niż w przypadku popularnych programów komercyjnych.

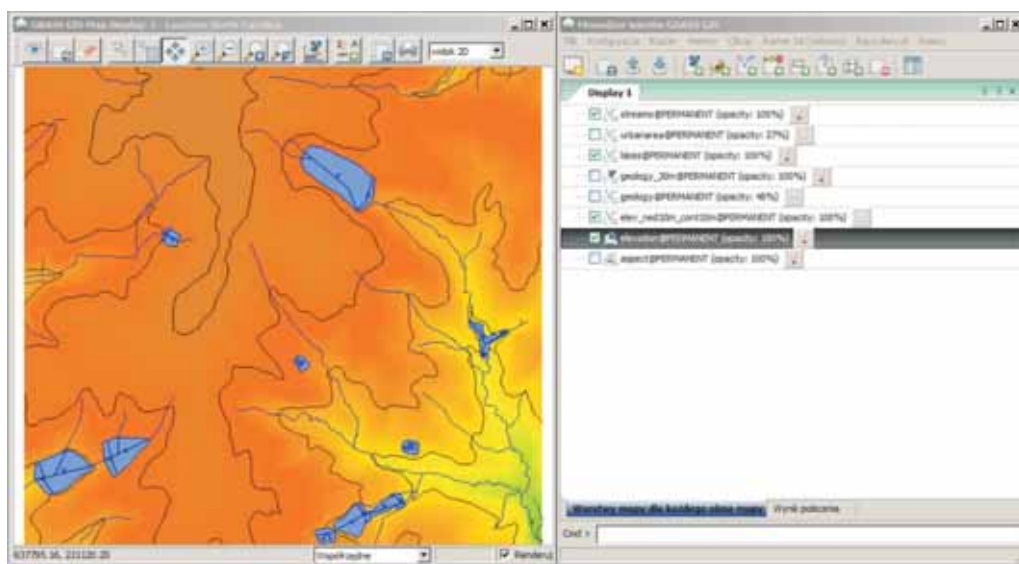


Fig. 6.19. Okna systemu GIS GRASS w środowisku systemu operacyjnego MS Windows

Okno po stronie lewej służy do wyświetlania zobrazowań danych w postaci warstw mapy, a okno po stronie prawej jest menadżerem przetwarzanych zbiorów danych i procedur wykorzystywanych przy tym przetwarzaniu

System Quantum GIS (QGIS) jest najmłodszym systemem spośród trzech tu prezentowanych. Znajduje to swój wyraz w zastosowaniu w nim wielu nowych zaawansowanych technologii, m.in. jest napisany w języku C++, ma także interfejs klienta usług WMS, WMTS, WFS i WFS-T, co pozwala na przetwarzanie danych przesyłanych z serwerów geoinformacyjnych oraz do tych serwerów jako dane uzupełnione, poprawione lub uaktualnione.

Obok własnych procedur przetwarzania danych geoprzestrzennych, Quantum GIS ma zaimplementowany interfejs do większości z ponad 330 procedur systemu GIS GRASS, który w tym przypadku stanowi wbudowany moduł. Takie powiązanie obu systemów pozwala połączyć funkcjonalność systemu GIS z funkcjonalnością systemu GRASS i można przyjąć, że jest to rozwiązanie optymalne i polecane do opracowywania schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd. Jednak w wielu przypadkach wykorzystanie pełnej funkcjonalności systemu GRASS jest znacznie korzystniejsze poprzez bezpośredni interfejs graficzny (GUI) tego systemu.

6.3.2. System GeoMedia Professional firmy Intergraph

GeoMedia Professional jest systemem GIS dla systemów operacyjnych z rodziny Windows. Funkcjonalność tego oprogramowania pozwala użytkownikowi na pozyskiwanie danych i ich analizowanie, tworzenie baz danych i nowych klas obiektów, jak również przekształcanie w jednym środowisku warstw informacyjnych GIS w mapy do celów dystrybucji i prezentacji. Technologia „serwera danych” pozwala, bez potrzeby konwersji czy też importu, na analizowanie informacji pochodzących z innych systemów przetwarzania danych, m.in.: MGE, ArcView (shapefile), ArcInfo, MapInfo, pliki CAD (Microstation, AutoCAD), MS Access, Oracle, SQL Server. Najnowsze wersje programu pozwalają również na połączenia do danych publikowanych poprzez

usługi WMS i WFS. Istotną cechą programu są dynamiczne analizy zarówno przestrzenne, jak i atrybutowe oraz dynamiczne obliczenia i operacje wykonywane przy pomocy atrybutów funkcyjnych. Powoduje to, że zmiany wprowadzone w danych źródłowych wywołują z kolei zmiany w wynikach analiz i wynikach obliczeń/operacji. Źródła danych o różnych układach współrzędnych są transformowane „w locie” do układu współrzędnych zdefiniowanego przez użytkownika dla przestrzeni roboczej programu. GeoMedia Professional jest jednocześnie platformą dla licznych specjalistycznych modułów/rozszerzeń, m.in.: GeoMedia Terrain (przetwarzanie numerycznego modelu terenu NMT), GeoMedia Fusion (harmonizacja danych) oraz GeoMedia Grid (przetwarzanie danych gromadzonych w modelu regularnej siatki rastrowej).

7. ŹRÓDŁOWE ZBIORY DANYCH

W ostatnich latach ilość dostępnych danych geoprzestrzennych w formie cyfrowej, potrzebnych do opracowywania schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd, wzrosła w Polsce wielokrotnie. Najogólniej dane te można podzielić na dane hydrogeologiczne, będące w dyspozycji państwowej służby hydrogeologicznej (PSH), opisane w rozdziale 7.1, i dane z zakresu innych dyscyplin, głównie geologiczne i hydrograficzne, ale także z zakresu nauk o Ziemi lub związanych ze środowiskiem, opisane w rozdziale 7.2.

Inny ważny w tym przypadku podział dostępnych danych dotyczy ich formy, sposobu przechowywania i udostępniania. Biorąc pod uwagę powyższe kryteria podziału, można wyróżnić następujące kategorie danych:

1. Mapy cyfrowe – seryjne opracowania kartograficzne najczęściej w podziale arkuszowym, zapisane w formatach przeznaczonych do danych geoprzestrzennych. W terminologii INSPIRE dane tego typu są nazywane seriami zbiorów danych. Modele tych danych są na ogół oparte na tradycyjnych modelach kartograficznych eksponujących ich formę graficzną, a sprawa tematycznych danych atrybutowych jest tam na dalszym miejscu. Z tego względu służą one głównie do oglądania treści map, a wykorzystanie ich do przetwarzania geoinformacji jest utrudnione. W stosunku do danych źródłowych są to dane znacznie przetworzone. Najczęściej są przechowywane w repozytoriach plików i udostępniane w podziale arkuszowym na nośnikach danych, np. płytach CD. Typowym przedstawicielem tej kategorii jest Mapa hydrogeologiczna Polski 1:50 000.
2. Zbiory danych cyfrowych typu pokrycie w formie macierzowej (rastrowej) i serie tych zbiorów. Typowymi przedstawicielami w tej kategorii są modele powierzchni terenu (dane DEM), np. SRTM-3 lub inne w formacie DTED-1 lub DTED-2 oraz ortoobrazy i dane *Corine Land Cover* w wersji rastrowej. Formy przechowywania i udostępniania są w tym przypadku takie same, jak map cyfrowych, jednak często są także dostępne poprzez sieć internetową za pomocą protokołu FTP (*File Transfer Protocol*).
3. Bazy danych – zbiory danych nadzorowane przez systemy zarządzania. Systemy takie są nazywane systemami zarządzania bazami danych SZBD (*Database Management System*, DBMS). Nie każdy zbiór danych jest zarządzany przez SZBD i przez to termin baza danych jest często nadużywany. Korzystanie z danych zawartych w bazie danych polega na komunikacji z tą bazą (lokalnie lub przez sieć) na podstawie ustalonego protokołu, najczęściej związanego z językiem SQL (*Structured Query Language*). Systemy baz danych są stosowane w przypadkach, gdy zbiory danych są bardzo duże i raczej jednorodne pod względem treści i struktury. System zarządzania bazą danych pozwala przy pomocy języka SQL wybrać jakąś część danych z całego wielkiego zbioru tak, aby spełniały określone kryteria, np. dane z określonego wybranego obszaru, gdy baza zawiera dane z obszaru całego kraju. Bazy danych, a ściślej systemy nimi zarządzające, dzielą się najogólniej na relacyjne, obiektowe i relacyjno-obiektowe.

W bazach obiektowych językiem zapytań jest OQL (*Object Query Language*). Najpopularniejszymi systemami baz danych, stosowanymi do geoinformacji, jest otwarty system PostgreSQL z rozszerzeniem geoprzestrzennym dla prostych wyróżnień PostGIS i system komercyjny Oracle Database z rozszerzeniem Oracle Spatial.

4. Serwery geoinformacyjne (geoserwery) – najnowsza i najbardziej zaawansowana technologicznie forma przesyłania i udostępniania danych geoprzestrzennych. Geoserwery są głównymi elementami węzłów infrastruktury geoinformacyjnej i realizują standardowe sieciowe usługi w zakresie danych geoprzestrzennych, z których najważniejsze to:

- CSW (*Catalogue Service-Web*) – usługa katalogowa wyszukiwania zbiorów danych geoprzestrzennych, serii tych zbiorów i usług sieciowych związanych z tymi danymi.
- WMS (*Web Map Service*) – usługa sieciowa przeglądania danych wyszukanych przy pomocy usługi CSW.
- WMTS (*Web Map Tile Service*) – rodzaj usługi WMS o mniejszych możliwościach, jednak znacznie szybsza ze względu na udostępnianie gotowych fragmentów (*tiles*) zobrazowań, z których po stronie klienta jest budowany obraz mapy.
- WFS (*Web Feature Service*) – usługa udostępniania (pobierania) danych geoprzestrzennych typu wyróżnienie w formie wektorowej. Dane te mogą być przy określonych kryteriach wybrane z bazy lub repozytorium i są do systemu klienckiego przesyłane w postaci pliku języka GML, który zawiera kolekcję (zbiór) wybranych wyróżnień (*element Feature-Collection*).
- WFS-T (*Web Feature Service Transactional*) – usługa analogiczna do WFS, umożliwiająca ponadto przesyłanie do serwera wyróżnień, które mogą być umieszczone w bazie danych; w ten sposób można zdalnie zasilac bazę, poprawiac jej zawartość lub ją aktualizowac.
- WCS (*Web Coverage Service*) – usługa udostępniania (pobierania) danych geoprzestrzennych typu pokrycie macierzowe (rastrowe), w tym także ortoobrazy.
- WCS-T (*Web Coverage Service Transactional*) – usługa analogiczna do WCS, pozwalająca na przesyłanie do serwera danych typu pokrycie, które mogą być umieszczone w jego repozytorium.
- WPS (*Web Processing Service*) – usługa przetwarzania danych geoprzestrzennych, głównie typu wyróżnienia w formie wektorowej. System kliencki wysyłając polecenie przetwarzania określa, jakiego rodzaju ma być to przetwarzanie i przesyła zbiór danych do przetworzenia lub wskazuje miejsce, gdzie ten zbiór się znajduje.
- WCPS (*Web Coverage Processing Service*) – usługa analogiczna do WPS, pozwalająca na przetwarzanie danych typu pokrycie w formie macierzowej (rastrowej).

Wymienione typy usług realizowanych przez geoserwer stanowią technologiczną podstawę funkcjonowania infrastruktury INSPIRE, która w myśl dyrektywy będzie budowana również w Polsce i obejmie także dane z zakresu hydrogeologii, w tym dane dotyczące JCWPd. W miarę postępu prac nad budową infrastruktury krajowej, ilość danych geoprzestrzennych dotyczących JCWPd i dostępnych przy pomocy tych usług, będzie się szybko zwiększać. Można oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości będzie to podstawowa forma udostępniania danych hydrogeologicznych z różnych zakresów, w tym także danych dotyczących JCWPd. Bardziej obszerny i szczegółowy opis problematyki wyżej wymienionych usług jest zawarty w monografii poświęconej metodyce i technologii serwerów tematycznych (Michalak, 2010a).

7.1. Zbiory danych hydrogeologicznych w dyspozycji państwowej służby hydrogeologicznej

W dyspozycji państwowej służby hydrogeologicznej (PSH) znajdują się następujące zbiory danych hydrogeologicznych, które mogą i w miarę potrzeby powinny być wykorzystane przy opracowywaniu specyfikacji JCWPd:

- Centralny Bank Danych Hydrogeologicznych (CBDH, Bank HYDRO);
- Bank Danych Wód Podziemnych zaliczonych do kopalin (Bank MINERALNE), należący do państwowej służby geologicznej;
- Baza danych monitoringu wód podziemnych (MWP);
- Baza danych Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GIS GZWP);
- Baza danych o poborze wód podziemnych z ujęć (POBORY);
- Baza danych zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych;
- Baza danych GIS Mapy hydrogeologicznej Polski 1:50 000 (GIS MHP).

Są to relacyjne bazy danych obsługiwane w systemie zarządzania Oracle. Zawierają tablice znormalizowane. Mają charakter baz danych przestrzennych lub atrybutowych. Są w nich przechowywane dane liczbowe, słownikowe i opisowe. Wszystkie wymienione bazy zawierają informacje o współrzędnych geograficznych i topograficznych w zdefiniowanych układach odniesienia, które umożliwiają zobrazowanie (wizualizację) położenia wybranych obiektów/warstw tematycznych. Jednakże warstwy te są tylko zobrazowane na ekranie lub papierze w systemie GIS. Do obsługi baz służą specjalnie napisane aplikacje (System przetwarzania danych PSH oraz Platforma MHP). Wyróżnia się wśród nich narzędzia oparte na GeoMedia Professional 6.1, umożliwiające wykonywanie skomplikowanych analiz atrybutowych i przestrzennych przy jednoczesnym dostępie do kilku hydrogeologicznych baz danych, np.: Bank HYDRO, MWP, GIS GZWP i GIS MHP. W chwili obecnej cała funkcjonalność aplikacji desktopowych jest przenoszona na rozwiązania oparte o serwer aplikacyjny WebLogic z interfejsem przeglądarki internetowej.

Poniżej przedstawiono pokrótce zakres tematyczny i źródła informacji dla poszczególnych baz, a także formy udostępniania przechowywanych w nich danych.

Centralny Bank Danych Hydrogeologicznych (CBDH, Bank HYDRO) jest bazą, w której są gromadzone informacje o ujęciach wód podziemnych oraz obiektach hydrogeologicznych wchodzących w ich skład – źródłach, otworach eksploatacyjnych, badawczych i obserwacyjnych, ujmujących zwykle wody podziemne na terenie Polski. Baza danych zawiera dane litostratygraficzne, hydrodynamiczne, hydrochemiczne, techniczne, informacje o zasobach itp. Bank HYDRO powstał w 1975 r. i obecnie zawiera dane o około 130 000 obiektów hydrogeologicznych z obszaru całego kraju. Zasoby i system Banku HYDRO pozwalają użytkownikom na szybkie uzyskanie informacji na temat aktualnego stanu rozpoznania hydrogeologicznego wybranego rejonu kraju.

Dane gromadzone w Banku HYDRO pochodzą z dokumentacji hydrogeologicznych oraz kart rejestracyjnych studni, dokumentów wydawanych przez organy administracji państwowej szczebla powiatowego i wojewódzkiego, dotyczących eksploatacji wód podziemnych, decyzji przyjmujących dokumentację hydrogeologiczną ustalającą zasoby eksploatacyjne ujęć wód podziemnych oraz z pozwoleń wodnoprawnych na eksploatację wód podziemnych. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego, do którego zgodnie z obowiązującym prawem są przesyłane powyższe dokumenty, stanowi jedno z najważniejszych źródeł informacji Banku HYDRO.

Narzędzia stosowane do obsługi Banku HYDRO umożliwiają udostępnianie danych w różnych formatach, z czego do najpopularniejszych należą:

- komplety karta–profil otworu – wydruki i pliki .pdf,
- zestawienia tabelaryczne dowolnie zdefiniowanych atrybutów – wydruki i pliki .xls,
- zestawienia tabelaryczne informacji tematycznych tzw. raporty predefiniowane – wydruki i pliki .pdf,
- zestawienia profili otworów do przekrojów geologicznych – pliki .jpg,
- mapy dokumentacyjne dla niewielkich obszarów z redakcją etykiet – wydruki,
- wykresy dotyczące parametrów hydrogeologicznych lub hydrochemicznych,
- baza danych w formacie Access – pliki .mdb.

Informacje o charakterze ogólnym, dotyczące obiektów hydrogeologicznych zgromadzonych w Banku HYDRO, są dostępne na stronach internetowych: <https://epsh2.pgi.gov.pl/Cbdh/#log> oraz <http://www.psh.gov.pl/>.

Bank Danych Wód Podziemnych zaliczonych do kopalin (Bank MINERALNE) obejmuje m.in. informacje o obiektach hydrogeologicznych (otworach, źródłach, sztolniach, szybach itp.), w których występują wody podziemne uznane za kopaliny (wody lecznicze, wody termalne i solanki) lub wody mineralne (o mineralizacji powyżej 1 g/dm^3) i swoiste nie będące kopalinami, które ze względu na skład chemiczny lub własności fizyczne w przyszłości mogą zostać do kopalin zaliczone. Przechowywane są tu dane o położeniu obiektu, profilu litostratygraficznym, konstrukcji technicznej otworu, wynikach badań hydrogeologicznych, analizach fizykochemicznych wód i rozpuszczonych w nich gazów, składzie izotopowym wód, badaniach i pomiarach stacjonarnych, zasobach eksploatacyjnych, pozwoleniach wodnoprawnych na odprowadzanie wydobytych wód, zasobach dyspozycyjnych, złożach, koncesjach, obszarach i terenach górniczych, strefach ochrony uzdrowiskowej. Baza powstała w 2005 r., a od 2006 r. jest systematycznie uzupełniana i aktualizowana. Obecnie w bazie zgromadzono dane o ponad 1600 obiektach.

Źródłem danych są dokumentacje hydrogeologiczne i geologiczne; zawiadomienia Ministra Środowiska o przyjęciu bez zastrzeżeń dokumentacji hydrogeologicznych ustalających zasoby (eksploatacyjne i dyspozycyjne) wód podziemnych uznanych za kopaliny; koncesje Ministra Środowiska na wydobywanie wyżej wymienionych wód ze złóż; statuty uzdrowisk i operaty uzdrowiskowe; plany zagospodarowania złóż; plany ruchu zakładów górniczych oraz inne dokumenty będące w dyspozycji użytkowników złóż.

Dane gromadzone w Banku MINERALNE są udostępniane w analogicznej formie, jak te pochodzące z Banku HYDRO. Informacje o charakterze ogólnym, dotyczące obiektów hydrogeologicznych, są dostępne również na stronach internetowych: <http://mineralne.pgi.gov.pl/index.php?page=49>; oraz <http://www.psh.gov.pl/>.

Baza danych monitoringu wód podziemnych (MWP) zawiera wyniki pomiarów wahań zwierciadeł wód podziemnych i wydajności źródeł, wyniki analiz chemicznych próbek wody oraz informacje na temat punktów badawczych, z których dane pochodzą. Baza powstała w 2004 r., łącząc ze sobą dwie bazy istniejące od kilkadziesiąt lat w PIG:

- System Obserwacji Hydrogeologicznych SOH – baza danych pochodzących z sieci stacjonarnych obserwacji wód podziemnych. Sieć pomiarowa istnieje od 1972 r., pomiary w niektórych punktach badawczych są prowadzone od 1966 r. W bazie są gromadzone podstawowe informacje o punktach obserwacyjnych oraz wyniki obserwacji wahań zwier-

ciadła wody (pomiaru głębokości zwierciadła lub wydajności źródła w każdy poniedziałek o godzinie 7.00) oraz analiz fizykochemicznych (z wybranych punktów badawczych – raz w roku).

- Monitoringowa Baza Danych (MONBADA) – baza monitoringu jakości wód podziemnych systemu Państwowego Monitoringu Środowiska, utworzona w 1991 r.

Aktualnym źródłem danych są wyniki pomiarów i analiz wykonanych w ramach zadań PSH oraz wyniki analiz wykonanych na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ). Pomiaru wahań zwierciadła wód podziemnych są wykonywane o godzinie 6.00 w stacjach hydrogeologicznych I rzędu codziennie, a w stacjach hydrogeologicznych II rzędu – raz w tygodniu, w poniedziałki. Monitoring stanu chemicznego jest realizowany zgodnie z harmonogramem określonym w Rozporządzeniu Ministra Środowiska nr 685 z dnia 13 maja 2009 r. – w cyklach jeden lub dwa razy w roku.

Dane bazy mogą być udostępniane w różnych formach: w postaci cyfrowej (w dowolnie kształtowanych zestawieniach tabelarycznych) – pliki .csv, .xls, .mdb; graficznej – wykresy, diagramy, histogramy oraz w postaci map – pliki .jpg. Ponadto informacje o charakterze ogólnym są publikowane w Kwartalnych Biuletynach Informacyjnych Wód Podziemnych PSH oraz Rocznikach Hydrogeologicznych PSH, dostępnych na stronach internetowych: <http://www.psh.gov.pl> oraz www.pgi.gov.pl.

Baza danych o poborze wód podziemnych z ujęć (Baza POBORY) to baza, w której są zgromadzone dane dotyczące wartości rocznego poboru i sprzedaży wód podziemnych z lat dwutysięcznych z ujęć w Polsce działających w ramach szczególnego korzystania z wód (pozwolenia wodnoprawnego). Ponadto baza zawiera informacje o poborze z ujęć na zaopatrzenie ludności, instytucji publicznych, usług, przemysłu, rolnictwa i leśnictwa (z wyłączeniem odwodnień kopalń i odwodnień budowlanych). Baza jest uaktualniana co roku.

Dane w bazie pochodzą od użytkowników lub właścicieli ujęć na obszarze kraju oraz z Banku HYDRO. Udostępniane są w formie tabelarycznej w plikach .xls.

Baza Danych Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GIS GZWP) to baza zawierająca informacje dotyczące GZWP: lokalizację (zbiorników udokumentowanych, nieudokumentowanych, a także tych usuniętych już z rejestru), lokalizację stref ochronnych, dane dotyczące jakości wód podziemnych, zasoby dyspozycyjne oraz podstawowe informacje hydrogeologiczne (typ, stratygrafia utworów wodonośnych, średnia głębokość ujęć).

Baza jest tworzona na podstawie dokumentacji hydrogeologicznych głównych zbiorników wód podziemnych. Formami udostępnienia informacji z tej bazy są dane tabelaryczne – pliki .xls, bądź mapy – pliki .jpg.

Baza danych zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zawiera informacje dotyczące stanu rozpoznania zasobów zwykłych wód podziemnych w Polsce w wydzielonych rejonach wodno-gospodarczych (Herbich i in., 2007) i jest jednym ze stałych zadań realizowanych przez PSH w PIG–PIB. Dane znajdujące się w bazie są wykorzystywane m.in.:

- do sporządzania informacji na temat aktualnego stanu udokumentowania zasobów dyspozycyjnych, określonych w trybie zgodnym z prawem geologicznym i górniczym, a w obszarach nie objętych udokumentowaniem hydrogeologicznym – zasobów perspektywicznych, oszacowanych metodami uproszczonymi;

- na potrzeby planowania prac dotyczących rozpoznawania zasobów i przeprowadzania bilansów w rejonach wodno-gospodarczych, obszarach bilansowych i obszarach dokonywania oceny stanu ilościowego wód podziemnych.

Baza została utworzona w systemie GeoMedia (bazy Access i Oracle), w układzie współrzędnych 1992 (EPSG: 2180). Główną klasą obiektów są wydzielone rejonny wodno-gospodarcze, a ich atrybutami są m.in.: informacje o wielkości zasobów dyspozycyjnych, perspektywicznych, modułach zasobów; informacje o obszarach bilansowych, regionach wodnych i dorzeczach, w obrębie których znajduje się wydzielony rejon wodno-gospodarczy.

Źródłem danych dla bazy są dokumentacje hydrogeologiczne wykonane dla ustalenia zasobów dyspozycyjnych zwykłych wód podziemnych, pozytywnie zaopiniowane przez Komisję Dokumentacji Hydrogeologicznych (KDH) i przyjęte przez zamawiającego (np. Ministra Środowiska) odpowiednią decyzją.

Dane są udostępniane w postaci plików .mdb (wewnętrzny format systemu GeoMedia) oraz zwizualizowanych kompozycji mapowych w formatach .jpg i .pdf. Istnieje również możliwość udostępniania danych w formacie ESRI Shapefile.

Mapa hydrogeologiczna Polski 1:50 000 (GIS MHP) jest systemem informacji zawierającym dane geoprzestrzenne: punktowe, liniowe i powierzchniowe (wraz z atrybutami opisowymi), dotyczące warunków hydrogeologicznych. W bazie tej znajdują się informacje o głównych użytkowych piętrach/poziomach wodonośnych (GUPW), charakterystyka jakościowa, ilościowa oraz zagrożenia wód podziemnych. Określone są tu warunki występowania i hydrodynamika pierwszego poziomu wód podziemnych (PPW-WH), jak również jakość oraz wrażliwość na zanieczyszczenia pierwszego poziomu wód podziemnych (PPW-WJ). Baza danych GIS MHP jest prowadzona w formacie GeoMedia (baza danych Oracle lub Access), w układzie 1992 (EPSG: 2180).

Źródłem danych bazy GIS MHP, dotyczących głównego użytkowego poziomu wodonośnego, było 1069 arkuszy Mapy hydrogeologicznej Polski 1:50 000, opracowanych w latach 1996–2004. Każdy z arkuszy stanowi pojedynczy wycinek projektu GIS, wykonany w systemie MGE/Microstation w odpowiedniej strefie układu 1942: 1942/15(6); 1942/21(6); 1942/27(6). Integralną częścią opracowanego arkusza, oprócz projektu GIS wraz z wydrukami, są objaśnienia tekstowe i tabelaryczne (pliki .doc i .xls) oraz przekroje hydrogeologiczne (.cit, .tif). Po zakończeniu prac nad wersją arkuszową MHP (GUPW), dokonano konwersji i scalenia poszczególnych baz danych 1069 arkuszy w ciągłą przestrzennie bazę danych MHP GIS (Oracle/Access).

Opracowania związane z pierwszym poziomem wodonośnym (PPW-WH i PPW-WJ) są w trakcie realizacji. Wykonywane są one w systemie GeoMedia Access w postaci bloków, tj. grupy sąsiadujących arkuszy w układzie 1942. Tak jak w przypadku opracowania związanego z GUPW, oprócz projektu GIS dla każdego arkusza są dostępne objaśnienia tekstowe (.doc) oraz przekroje hydrogeologiczne (.cit, .tif, .jpg).

Dane z baz MHP są udostępniane w postaci plików .mdb (system GeoMedia) oraz plików .jpg, .tif i .pdf jako gotowych kompozycji. Istnieje również możliwość udostępniania danych w formacie ESRI Shapefile.

7.2. Inne zbiory danych przestrzennych wykorzystywane w modelach przepływu

Opracowanie schematu warunków hydrogeologicznych JCWPd tak, aby mogły być wykorzystane w różnych analizach, zaczynając od bardzo prostych wykonywanych przy pomocy typowych systemów geoinformatycznych (typu GIS), a kończąc na złożonych badaniach symulacyjnych przy pomocy numerycznych modeli przepływu, wymaga użycia bardzo wielu różnorodnych danych geoprzestrzennych w postaci cyfrowej. Obok danych tworzonych przez hydrogeologów, opisanych w rozdziale 7.1, mają tu zastosowanie także dane z innych dyscyplin z zakresu nauk o Ziemi, a także dane spoza tego zakresu. Obecnie w Polsce jest już dostępnych wiele rodzajów danych tej kategorii. Mogą one być z powodzeniem wykorzystane w pracach nad tymi schematami. Poniżej przedstawiono listę zbiorów takich danych lub serii zbiorów danych z dziedzin innych niż hydrogeologia.

1. Topograficzne dane referencyjne, stanowiące pewnego rodzaju tło danych dziedzinowych, pozwalające zlokalizować dane bez przypisania przestrzennego lub z przypisaniem pośrednim, a także umożliwiające weryfikację danych tematycznych pod względem poprawności lokalizacji lub powiązania ich z obiektami na powierzchni terenu. Podstawowe polskie zbiory danych lub ich serie z tego zakresu to:
 - topograficzna mapa cyfrowa w formacie ESRI Shapefile;
 - cyfrowe ortooobrazy satelitarne, w tym Landsat 7 ETM+ w rastrowych formatach graficznych z georeferencją;
 - Państwowy Rejestr Nazw Geograficznych w formacie ESRI Shapefile;
 - Państwowy Rejestr Granic i Powierzchni Jednostek Podziału Terytorialnego Kraju – PRG w formacie ESRI Shapefile;
 - Baza Danych Topograficznych – użytkowanie ziemi.
2. Dane z zakresu nauk o Ziemi:
 - Numeryczne modele powierzchni terenu o rozdzielczości siatki 100 m i niższej. Dane tego rodzaju stanowią, obok danych z otworów wiertniczych, podstawę do opracowania modelu budowy przestrzennej jednostki hydrogeologicznej, w tym przypadku JCWPd. Są także danymi porównawczymi przy ocenie poprawności określenia rzędnych otworów wiertniczych; dane te są także niezbędne do szacowania przestrzennej zmienności parametrów infiltracji opadów atmosferycznych.
 - Mapa podziału hydrograficznego Polski (MPHP) 1:50 000 w formacie ESRI Shapefile. Jest to podstawowy zasób danych wykorzystywany przy ustalaniu związków wód podziemnych z wodami powierzchniowymi i w konsekwencji służący określaniu warunków brzegowych w schematach warunków hydrogeologicznych.
 - Załączniki raportu z realizacji art. 5 i zał. 2. Ramowej Dyrektywy Wodnej 2000/60/WE – Charakterystyka obszaru dorzecza w skali 1:50 000 w formacie ESRI Shapefile. Raport zawiera następujące zbiory tematyczne: jednolite części wód płynących, jednolite części wód stojących, jednolite części wód przejściowych i jednolite części wód przybrzeżnych. Z uwagi na potrzebę wiązania JCWPd z jednolitymi częściami wód powierzchniowych (JCWP), dane znajdujące się w tych zbiorach są potrzebne do opracowania schematów warunków JCWPd.

- Dane geoprzestrzenne NATURA 2000, dane przestrzenne Centralnego Rejestru Form Ochrony Przyrody i zbiory danych Systemu Informacji Przestrzennej o Mokradałach (GIS Mokradała). Istotnym czynnikiem ograniczającym swobodę wykorzystania wód podziemnych jest wpływ tych działań na środowisko przyrodnicze, a szczególnie na obszary, gdzie to środowisko wymaga ochrony. Z tego względu zbiory danych należące do tej kategorii są niezbędne do określenia miejsc, gdzie oddziaływanie antropogeniczne na wody podziemne wymaga ograniczeń ze względu na niekorzystny wpływ, jaki to oddziaływanie może spowodować w chronionym środowisku przyrodniczym.
 - Zbiory danych przestrzennych CORINE Land Cover (CLC90, CLC2000, CLC2006). Jest to ogólnoeuropejski zasób danych dotyczący form pokrycia terenu, zapisanych zarówno w formie wektorowej, jak i macierzowej (rastrowej). Szczegółowość tych danych jest dostateczna na potrzeby opracowania schematów warunków hydrogeologicznych JCWPd i powinny być one wykorzystane głównie do szacowania przestrzennej zmienności parametrów infiltracji opadów atmosferycznych.
 - Szczegółowa mapa geologiczna Polski (SMGP) 1:50 000 i Mapa litogenetyczna Polski 1:50 000 w formacie ESRI Shapefile. Zasoby te są niezbędne w dwóch przypadkach: a) przy opracowaniu modelu budowy przestrzennej JCWPd jako dane o geologii i litologii utworów występujących na powierzchni oraz b) łącznie z danymi DEM i CLC do szacowania przestrzennej zmienności parametrów infiltracji opadów atmosferycznych.
 - Mapa geologiczno-gospodarcza Polski (MGGP) 1:50 000 i Mapa geośrodowiskowa Polski (MGP) 1:50 000 w formacie ESRI Shapefile. Te dwa seryjne opracowania kartografii cyfrowej zawierają dane z zakresu: złoża kopalin oraz górnictwo i przetwórstwo kopalin, wody powierzchniowe i podziemne, warunki podłoża budowlanego, gleby chronione, obszary leśne, ochrona przyrody i zabytków kultury, geochemia środowiska i składowanie odpadów. W wielu przypadkach zakres tematyczny pokrywa się z zakresami innych zasobów i z tego względu potrzebne jest ustalenie w obu przypadkach jakości danych oraz tego, które z nich są pierwotne, a które wtórne. W zastosowaniu tych zasobów do określania schematów warunków należy je traktować raczej jako pomocnicze.
3. Dane infrastruktury INSPIRE z zakresu I grupy tematycznej: „Nazwy geograficzne”, „Jednostki administracyjne”, „Sieci transportowe”, „Hydrografia” i „Obszary chronione”. Według harmonogramu realizacji postanowień dyrektywy INSPIRE dane te będą dostępne w krajowych węzłach infrastruktury przed 2017 r. Ich opracowanie będzie jednak rozpoczęte wcześniej i będą one mogły być wykorzystane w trybie *off-line*. Dane te będą się różniły od obecnie dostępnych głównie formą zapisu, modelami struktur, kompletnością i jakością.
4. Dane infrastruktury INSPIRE z zakresu II i III grupy tematycznej. Tytuły tematów tej grupy z określeniem ich związku z JCWPd są podane w tabeli 2.1, a bardziej dokładne określenie zakresu danych zawiera dokument opracowany przez INSPIRE DTDS (2008). Dane te będą udostępniane dopiero przed 2019 r.

Powyżej są przedstawione jedynie główne kategorie danych, które mogą okazać się potrzebne w pracach nad schematami warunków hydrogeologicznych. Szczegółowe określenie, które dane, w jakim zakresie i w jaki sposób powinny być do tego celu użyte, wymaga głębszej ich analizy i wykracza poza zakres tego Informatora. Ponieważ liczba danych i ich różnorodność z każdym rokiem znacznie się zwiększa, listę tą należy traktować jako otwartą i prawdopodobnie w kolejnych etapach opracowywania schematów warunków hydrogeologicznych będzie można wykorzystywać nowe dane, których tu nie wymieniono.

8. PODSUMOWANIE

Opracowanie modeli koncepcyjnych jednolitych części wód podziemnych (JCWPd), wyróżnionych na obszarze kraju, zostało zakończone w 2010 r. Kolejnym etapem wdrażania Ramowej Dyrektywy Wodnej jest konstrukcja modeli przepływu wód podziemnych transgranicznych JCWPd i wykazujących słaby stan ilościowy lub chemiczny. Ten etap wymaga jednak stosowania jednolitej metodyki badawczej przez różne zespoły, które będą realizować modelowanie numeryczne wyróżnionych jednolitych części wód podziemnych.

Od wielu już lat w obliczeniach hydrogeologicznych nie stosuje się podejścia analitycznego. Nie jest bowiem możliwe podanie dokładnego analitycznego rozwiązania przepływów regionalnych lub dopływu do dużych ujęć bądź systemów odwadniających wyrobiska kopalniane. W niniejszym Informatorze przyjęto, że właściwym obecnie sposobem jest znalezienie przybliżonego rozwiązania równania opisującego trójwymiarowy przepływ wód podziemnych w złożonych ośrodkach porowych i szczelinowo-porowych. Modele umożliwiające wyznaczenie wartości rozwiązania w dyskretnych punktach przestrzeni i w dyskretnych chwilach czasu są przykładami rozwiązań przybliżonych. Aby można było poszukiwać rozwiązań przybliżonych, należy najpierw zagwarantować, że istnieje jednoznaczne rozwiązanie $\Phi(x, t)$ równania [3.19].

Podstawowym, wstępnym zadaniem zespołu przystępującego do konstrukcji modelu przepływu jest zebranie wszystkich danych dotyczących poszczególnych JCWPd w formie cyfrowej i potrzebnych do opracowania schematów warunków hydrogeologicznych, a także przetworzenia danych istniejących jedynie w formie nie-cyfrowej do formy cyfrowej, jeżeli w formie cyfrowej nie są dostępne. Celem tych prac jest stworzenie możliwości przetwarzania danych do postaci pozwalającej na wykonywanie analiz przestrzennych systemów hydrogeologicznych, wchodzących w skład poszczególnych JCWPd.

Bardziej szczegółowa analiza stanu wód i czynników wpływających na ten stan oraz czasowej dynamiki zmian, jakie zachodzą lub mogą zajść w przyszłości, wymaga podejścia bardziej zaawansowanego technologicznie. Ten problem został przedstawiony w rozdziale 2 Informatora.

Porównanie dwóch podstawowych dla tego Informatora dokumentów technicznych Ramowej Dyrektywy Wodnej wyraźnie pokazuje, że po kilku latach prac nad implementacją dyrektywy nie tylko zakres tematyczny danych dotyczących JCWPd i ich forma zapisu istotnie się zmienił. Zmianie uległa również terminologia stosowana 5 lat temu. Z tego względu w opracowaniu tym występują nieco inne pojęcia, niż używane w pierwszym etapie prac dotyczących JCWPd.

Z uwagi na znaczną liczbę specyfikacji, wynikającą z liczby wyodrębnionych w Polsce JCWPd zaleca się, aby zarówno ich części tekstowe, jak i cyfrowe miały formę jak najbardziej jednolitą. Z tego względu zaleca się przyjęcie jednego szablonu dla wszystkich opracowań tekstowych i spis treści takiego szablonu jest przedstawiony w formie propozycji.

W Informatorze skoncentrowano się na przeglądzie procesów fizycznych i ich opisach matematycznych, a w dalszej części – na sposobach zapisu danych i wynikach modelowania. Zwrócenie uwagi Czytelnika na wymagania dyrektywy INSPIRE wynika z potrzeby ujednolicenia zapisu numerycznego danych i wyników modelowania. Umożliwia to wymianę informacji między ze-

społami badawczymi i osobami korzystającymi z wyników modelowania w ramach biuletynów informacji publicznych, udostępnianych na portalach internetowych instytucji państwowych.

Informator zawiera bardziej szczegółowe prezentacje wybranych zagadnień z zakresu geomatyki w formie dodatków. W dodatku A przedstawiony jest ogólny zarys spisu treści dla części tekstowej specyfikacji warunków hydrogeologicznych JCWPd. Aby wykorzystać pełną funkcjonalność wspólnego dla wszystkich specyfikacji szablonu, przy pisaniu tekstu należy posłużyć się jego wersją elektroniczną w formacie dokumentu programu MS Word.

Opracowanie Informatora nie wyczerpuje problematyki modelowania przepływu wód podziemnych w obszarach JCWPd. Kolejna publikacja dotycząca tego zagadnienia powinna być poradnikiem modelowania, zawierającym przykłady opracowanych modeli dla różnych jednolitych części wód podziemnych.

LITERATURA

- ANDERSON M.P., WOESSNER W.W., 1992 — Applied groundwater modeling: simulation flow and advective transport. Academic Press, Inc., San Diego.
- BARENBLATT G.I., ZELTOV Yu.P., 1960 — Fundamental equations of filtration of homogeneous liquids in fissured rocks. *Doklady USSR Acad. of Sc.*, **132**, 3: 546–548.
- BEAR J., 1972 — Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.
- BEAR J., VERRUIJT A., 1987 — Modeling groundwater flow and pollution (theory and applications of transport in porous media). D. Reidel Publishing Co., Dordrecht.
- BERKHOF K., 2007 — Groundwater vulnerability assessment to assist the measurement planning of the water framework directive – a practical approach with stakeholders. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **4**: 1133–1151.
- BETTENCOURT A.M., BRICKER S.B., FERREIRA J.G., FRANCO A., MARQUES J.C., MELO J.J., NOBRE A., RAMOS L., REIS C.S., SALAS F., SILVA M.C., SIMAS T., WOLFF W.J., 2003 — Typology and reference conditions for Portuguese transitional and coastal waters. Development of Guidelines for the Application of the European Union Water Framework Directive. INAG/IMAR. URL: <http://www.ecowin.org/ticor/documents/ticor%20book.pdf>.
- BGWM (Biuro Geodety Województwa Mazowieckiego), 2009 — Opis koncepcji identyfikatorów, wersjonowania zmian, stosowania reguły *nil reason*. URL: <http://www.geointegracja.gov.pl/download/file.php?id=80&sid=f2c1f79e942a2cf12ed12a99aee5eec0>.
- BOISVERTE E., BRODARIC B., 2010 — GroundWater Markup Language Specification v. 1.0. URL: http://ngwd-bdnes.cits.rncan.gc.ca/service/api_ngwds/en/gwml.html.
- BUTLER H., SCHMIDT C., SPRINGMEYER D., LIVNI J., 2007 — Spatial Reference – EPSG projection 2180 – ETRS89/Poland CS92. URL: <http://spatialreference.org/ref/epsg/2180/>.
- CARRERA-HERNÁNDEZ J.J., GASKIN S.J., 2006 — The groundwater modelling tool for GRASS (GMTG): Open source groundwater flow modelling. *Computers and Geosciences*, **32**, 3: 339–351.
- COOLS J., MEYUS Y., WOLDEAMLAKE S.T., BATELAAN O., De SMEDT F., 2006 — Large-scale GIS-based hydrogeological modeling of Flanders: a tool for groundwater management. *Environmental Geology*, **50**, 8: 1201–1209.
- CULLINGFORD R. (Working Group 3.1 – GIS), 2010 — Appendix 13.3: Guidance on the reporting of geographical data on groundwater bodies under the WFD and GWD. Appendix of Guidance Document No. 22 – Updated guidance on implementing the Geographical Information System (GIS) elements of the EU Water policy. URL: <http://eea.eionet.europa.eu/Public/>

irc/eionet-circle/eionet-telematics/library?l=/technical_developments/wise_technical_group/updated_2nd-edition/appendices_updated/appendix_13&vm=detailed&sb=Title.

DAVIS B.E., 2001 — GIS: A Visual Approach (2nd edition). OnWord Press, New York.

DOHERTY M., 2009 — Conceptual site models in hydrogeology and land contamination – an Environment Agency perspective. URL: <http://www.geolsoc.org.uk/gsl/groups/specialist/hydro/page1522.html>

DOMENICO P.A., SCHWARTZ F.W., 1990 — Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, New York.

DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A. (red.), 2002 — Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa. URL: http://www.mos.gov.pl/g2/kategoriaPliki/2009_04/d6e1baf4ccc946e5c1f7cac62c532e96.pdf.

EC (European Commission), 2009 — Guidance Document No. 22 – Updated Guidance on Implementing the Geographical Information System (GIS) Elements of the EU Water policy. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report – 2009-028. URL: http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/guidance_documents/guidance-no22-nov08pdf_1/_EN_1.0_&a=d.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:323:0011:0102:PL:PDF>

EC EDG (European Commission's Environment Directorate-General), 2010 — The Water Information System for Europe – WISE – Your gateway to european water information. URL: http://ec.europa.eu/environment/water/index_en.htm.

EIONET (European Topic Centre on Water), 2010 — Directive 2000/60/EC – Water Framework Directive – XML Schemas. URL: <http://water.eionet.europa.eu/schemas/dir200060ec>.

EP & CEU, 2000 — Directive 2000/60/EC (WFD) of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of Water policy: *Official Journal*, **327**. URL: http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index_en.html.

EP & CEU, 2007 — Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). URL: <http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2007:108:SOM:EN:HTML>.

ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.), 1998 — ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI White Paper. URL: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>.

ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.), 2009 — About the ESRI Grid format. ArcGIS Desktop Help 9.3. URL: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?id=3104&pid=3101&topicname>About_the_ESRI_Grid_format.

FURBISH D.J., 1997 — Fluid physics in geology. Oxford University Press, New York.

GALON R. (red.), 1972 — Geomorfologia Polski. 2. Polska Południowa. Niż Polski. PWN, Warszawa.

- GAŹDZICKI J., 2001 — Leksykon geomatyczny. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Warszawa.
- GEBBERT S., 2007 — Konzeption eines gekoppelten Strömungs- und Stofftransportmodells in GIS GRASS (Diplomarbeit). Technische Universität Berlin, Institut für angewandte Geowissenschaften, Berlin.
- GOŁĄB J., 1959 — Wykłady na Wydziale Geologii UW w latach 1957–59. Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- GOŁĄB J., 1964 — Podstawy racjonalnego ujęcia bilansu hydrogeologicznego dla obszaru Polski. *Spraw. z Czynności i Postępu Nauk.*, **4**, 1.
- GORELICK S.M., FREEZE R.A., DONOHUE D., KEELY J.F., 1993 — Groundwater contamination: Optimal capture and containment. Lewis Publishers, Boca Raton.
- GSI (Geological Survey of Ireland), 2010 — Groundwater Programme – Geological/GIS Consultancy: Groundwater Body Re-Delineation. URL: http://www.igi.ie/assets/files/Employment/GWB_Consultancy2010_advert.pdf.
- GUIDEBOOK on nuclear techniques in hydrology, 1968. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- GUYMON G.L., 1994 — Unsaturated zone hydrology. Prentice Hall, New Jersey.
- HALEK V., SVEC J., 1979 — Groundwater Hydraulics (Developments in Water Science), 7. Elsevier, Amsterdam.
- HERBICH P., DĄBROWSKI S., NOWAKOWSKI C., 2007 — Wydzielenie rejonów wodno-gospodarczych dla potrzeb zintegrowanego zarządzania zasobami wód podziemnych i powierzchniowych kraju. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- HOLZBECHER E., SOREK S., 2005 — Numerical models of groundwater flow and transport. *W: Encyclopaedia of hydrological sciences* (red. M.G. Anderson, J.J. McDonnell). John Wiley&Sons, New York.
- IGW-CGI-IUGS (Commission for the Management and Application of Geoscience Information – CGI, Interoperability Working Group – IWG, International Union of Geological Sciences – IUGS), 2008 — GeoSciML Cookbook – How To Map Data to GeoSciML Version 2. URL: http://www.geosciml.org/geosciml/2.0/cookbook/GeoSciML_Data_CookBook_V2.pdf.
- INSPIRE DTDS (Drafting Team “Data Specifications”), 2008 — Definition of Annex Themes and Scope. URL: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/reports/ImplementingRules/DataSpecifications/D2.3_Definition_of_Annex_Themes_and_scope_v3.0.pdf.
- INSPIRE DTDS (Drafting Team “Data Specifications”), 2010 — D2.5: Generic Conceptual Model, Version 3.3. URL: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/D2.5_v3_3.pdf.
- INSPIRE TWG GEOLOGY (INSPIRE Thematic Working Group Geology), 2010 — D2.8.II.4 Data Specification on Geology – Draft Guidelines. Internal INSPIRE Document.

- INSPIRE TWG HYDROGRAPHY (INSPIRE Thematic Working Group Hydrography), 2010 — D2.8.I.8 INSPIRE Data Specification on Hydrography – Guidelines. URL: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_HY_v3.0.1.pdf.
- ISO/TC 211 (Geographic Information/Geomatics), 2002 — ISO/DIS 19104 – Geographic information – terminology. NTS, Oslo.
- ISO/TC 211 (Geographic Information/Geomatics), 2005 — Technical Specification 19103, Geographic information – Conceptual schema language. Norma PN-EN-ISO 19103 – Język schematów pojęciowych. URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=37800.
- ISO/TC 211 (Geographic Information/Geomatics), 2009 — Technical Specification 19129, Geographic information – Imagery, gridded and coverage data framework. Norma ISO 19129 – Podstawy danych obrazowych, siatkowych i pokryciowych. URL: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=43041.
- ISO/TC 211 (Geographic Information/Geomatics), 2010 — Programme of work – version 29. URL: http://www.isotc211.org/opendoc/211n3030/211n3030_PoW_Version_29.doc.
- KARANJAC J., MACHKOVA M., PETRES R., 2008 — Transboundary groundwater between Bulgaria and Romania in Dobrudja/Dobrogea Area – EU/PHARE Technical Assistance Project. 3rd International Scientific Conference Balwois 2008. Ohrid, 27–31.05.2008. URL: http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-913.pdf.
- KAZIMIERSKI B., 2006 — Opis a model pojęciowy jednolitych części wód podziemnych. *Geologos*, 10.
- KAZIMIERSKI B., SADURSKI A., 2005 — Groundwater monitoring as a tool of the hydrogeological cartography in Poland in the light of Water Framework Directive. *Prz. Geol.*, **53**, 10/2.
- KLIMASZEWSKI M. (red.), 1972 — Geomorfologia Polski. 1. Polska Południowa. Góry i wyżyny. PWN, Warszawa.
- KONDRACKI J.A., 2009 — Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- KOWALCZYK A., ŁUKASZEWICZ A., MICHALAK J., 2007 — Problemy metodyczne modelowania przepływu wody podziemnej na przekrojach. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 13: 677–686. AGH, Kraków.
- KZGW (Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej), 2008 — Mapa dorzeczy i regionów wodnych. URL: http://www.kzgw.gov.pl/files/file/Materialy_i_Informacje/Dyrektywy_Unijne/Wodna/Mapa%20dorzeczy%20i%20regionow%20wodnych.pdf.
- LATKA A., MICHALAK J., 1983 — Analiza pola filtracji na przekroju przez nieckę mazowiecką przy pomocy pakietu programów ANPLA. *Pr. Inst. Biocybern. i Inż. Biomed. PAN*, **14**: 106–112.
- LATRE M.Á., ÁLVAREZ P.J., BÉJAR R., MURO-MEDRANO P.R., 2004 — Integrating legacy systems and the GIS elements of the Water Framework Directive into a spatial data infrastructure. 10th EC-GI & GIS Workshop, ESDI: The State of the Art, Warsaw, Poland, 23–25 June 2004. URL: http://www.ec-gis.org/Workshops/10ec-gis/papers/24june_latre.pdf.

- LAWLOR F., KELLY V., MILLS P., BARTLETT D., RYBACZUK K., 2003 — The Role of GIS and Data Management in the Implementation of the Water Framework Directive in Ireland. 9th EC GI & GIS Workshop, ESDI Serving the User, A Coruña, Spain, 25–27 June 2003.
URL: http://www.ec-gis.org/Workshops/9ec-gis/papers/posters_lawlor.pdf.
- LIDE D.R., 2001 — CRC Handbook of chemistry and physics, 82nd edition. CRC Press, Boca Raton.
- LOUKS D.P., MCKINNEY D.C., 1990 — Uncertainty analysis methods in groundwater modeling. *W: Computational Methods in Subsurface Hydrology* (red. G. Gambolati i in.). Springer-Verlag, Berlin.
- MAŁECKI J. (red.), 2006 — Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Poradnik metodyczny. UW, Warszawa.
- MAŁECKI J. (red.), 2008 — Przygotowanie materiałów i danych dla Opracowania modeli pojęciowych jednolitych części wód podziemnych dla obszaru Polski. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MAXEY G.B., 1964 — Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, 2: 124–129.
- MICHALAK J., 1997 — Obiektowe modele w hydrogeologii – system ASPAR. UW, Warszawa.
- MICHALAK J., 2003a — Geomatics in hydrogeology. *Geol. Quart.*, 47,1: 69–76.
- MICHALAK J., 2003b — Modele pojęciowe hydrogeologicznych danych geoprzestrzennych – podstawy metodyczne. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 5, 406.
- MICHALAK J., 2005 — HGLML – HydroGeoLogical Markup Language – znacznikowy język wymiany geoinformacji hydrogeologicznej. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 12: 499–504. UMK, Toruń.
- MICHALAK J., 2007 — Wysokorozdzielcze hydrogeologiczne modele przepływu. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 13: 707–714. AGH, Kraków.
- MICHALAK J., 2008 — Budowa modeli przepływu z wykorzystaniem danych infrastruktury geoinformacyjnej INSPIRE. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 10, 431: 161–168.
- MICHALAK J., 2009 — Opracowanie wskazań metodycznych do oceny stopnia penetracji hydraulicznej wielopoziomowego systemu wodonośnego w zlewniach rzek nizinnych na potrzeby identyfikacji bilansu hydrogeologicznego metodą analizy związku stanów retencji i odpływu podziemnego. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MICHALAK J., 2010a — Metodyka i technologia budowy geoserwera tematycznego jako komponentu INSPIRE. *Rocz. Geomat.*, 8, 3 (39).
- MICHALAK J., 2010b — Transformacja polskich danych przestrzennych do modeli INSPIRE. *W: Modelowanie danych przestrzennych. Rocz. Geomat.*, 8, 4 (40): 27–51.
- MICHALAK J., LEŚNIAK P.M., 2003 — Features and coverages in hydrogeological information. *Acta Geol. Pol.*, 53, 3: 247–255.

- MICHALAK J., NOWICKI Z. (red.), 2009 — Wyznaczanie zmian zasobów wód podziemnych w rejonach zbiorników małej retencji. Informator PSH. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- NAWALANY M., 1984 — Wody podziemne jako system dynamiczny. *Pr. nauk. PW*, **86**.
- NAWALANY M., 1986 — FLOSA 3D. Introduction to system analysis of three-dimensional groundwater flow (report) TNO-DGV Institute of Applied Geoscience, Delft.
- NAWALANY M., 1989 — FLOSA-FE finite element model of the three-dimensional groundwater velocity field (report) TNO-DGV Institute of Applied Geoscience, Delft.
- NOWICKI Z., OŁĘDZKA D. (red.), 2009 — Charakterystyka geologiczna i hydrogeologiczna zweryfikowanych JCWPd. URL: http://www.psh.gov.pl/plik/id,5140,v,artykul_3722.pdf.
- NOWICKI B., STANISZKIS W., 2002 — Inteligentny system zarządzania wiedzą – prezentacja projektu. 6. Konf.: Miasta w Internecie, Zakopane, 12–14. 06.2002. Mat. Konferencji eDemocracy, Zakopane.
- NOYES C.M., MALEY M.P., BLAKE R.G., 2000 — Defining hydrostratigraphic units within the heterogeneous alluvial sediments at Lawrence Livermore National Laboratory. URL: <http://www-erd.llnl.gov/library/JC-139779.pdf>.
- OGC (Open Geospatial Consortium), 1999 — The OpenGIS Abstract Specification. Version 4, OGC Arch., Wayland. URL: <http://opengis.org/public/abstract/99-100r1.pdf>.
- OGC (Open Geospatial Consortium), 2010 — OGC Standards and Specifications. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards>.
- OKOŁOWICZ W., MARTYN D., 1984 — Regiony klimatyczne. *W: Atlas geograficzny Polski*. PPWK, Warszawa.
- OŁĘDZKI J.R., 2007 — Regiony geograficzne Polski. Wyd. UW, Warszawa. URL: http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/Teledetekcja_Srodowiska/tom_38/.
- PACZYŃSKI B. (red.), 1995 — Atlas hydrogeologiczny Polski. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PACZYŃSKI B., 2002 — Systemy nieprzeobrażonych antropogenicznie zwykłych wód podziemnych Polski. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **400**: 37–55.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.), 2007 — Hydrogeologia regionalna Polski. 1. Wody słodkie. Państw. Inst. Geol., Warszawa. URL: http://www.mos.gov.pl/kategoria/315_tom_i_wody_slodkie/.
- PAZDRO Z., 1977 — Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PECK A., GORELICK S. M., MARSILY DE G., FOSTER S., KOVALEVSKY V., 1988 — Consequences of Spatial Variability in Aquifer Properties and Data Limitations for Groundwater Modeling Practice. *IAHS Publication*, **175**.
- PEDROS IOL, 2010 — Polska – opad roczny. URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polska_opad_roczny.png?uselang=pl.
- POLLARD P., 2004a — Groundwater body characterisation. Technical report on groundwater body characterisation issues as discussed at the workshop of 13th October 2003. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC).

URL: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/scienc_tec/cis/pdf/gw_characterisation.pdf.

POLLARD P., 2004b — Groundwater risk assessment. Technical report on groundwater risk assessment issues as discussed at the workshop of 28th January 2004. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). URL: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/scienc_tec/cis/pdf/gw_risk_assessment.pdf.

REFSGAARD J.C., HENRIKSEN H.J., 2004 — Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, **27**, 1: 71–82.

ROZPORZĄDZENIE Komisji (UE) nr 1089/2010 z dnia 23. listopada 2010 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w zakresie interoperacyjności zbiorów i usług danych przestrzennych (DzU UE nr 323, poz. 11, 2010). URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:323:0011:0102:PL:PDF>.

ROZPORZĄDZENIE Rady Ministrów z dnia 27. czerwca 2006 r. w sprawie przebiegu granic obszarów dorzeczy i regionów wodnych (DzU nr 239, poz. 2019, 2006).

ROSENBLUETH E., 1975 — Point estimates for probability moments. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **72**, 10: 3812–3814.

SCHEIDLEDER A., 2004 — Groundwater monitoring. Technical report on groundwater monitoring as discussed at the workshop of 25th June 2004. 14 December 2004. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC).

URL: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/groundwater/scienc_tec/cis/pdf/gw_monitoring.pdf.

SINICYN G., 1998 — Wpływ niepewności danych na precyzję oceny stanu środowiska wód podziemnych w otoczeniu składowisk odpadów (praca doktorska). PW, Warszawa.

SMITH B., 2001 — Fiat objects. Topoi. URL: <http://wings.buffalo.edu/philosophy/faculty/smith/rarticles/fatobjects.pdf>

SMITH B., MARK D.M., 1998 — Ontology and geographic kinds. *W*: Conference Paper: International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'98), Vancouver, Canada 12–15 July 1998. URL: <http://www.geog.buffalo.edu/ngia/ontology/SDH98.html>.

SNIFFER (Scotland & Northern Ireland Forum For Environmental Research), 2004 — Development of a Groundwater Vulnerability Screening Methodology for the WFD. URL: <http://www.sniffer.org.uk/>.

STAMOU A.I., SPANOUDAKI K., NANOU-GIANNAROU A., 2004 — Towards the development of integrated surface-ground water models for the implementation of the EU Water Framework Directive. *J. of IASME Transactions*, **4**, 2: 505–512. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2005athens/eesd/papers/505-093.doc>.

SUBIETA K., 1999 — Słownik terminów z zakresu obiektowości. Akad. Ofic. Wyd. PLJ, Warszawa.

SZYMANKO J., 1980 — Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wyd. Geol., Warszawa.

- THIEL K. (red.), 1989 — *Hydraulika skał w zagadnieniach stateczności podłoża budowli i stoków*. Jabłonna, 18–22. września 1989. Inst. Bud. Wod. PAN, Gdańsk.
- VAN GEER F.C., STROET B.M., YANGXIAO Z., 1991 — Using Kalman filtering to improve and quantify the uncertainty of Numerical Groundwater Simulations. 1. The role of system noise and its calibration. *Water Resour. Res.*, **27**, 8: 1987–1994.
- VAN GENUCHTEN M.T., ALVES W.J., 1982 — Analytical solution of the One-dimensional convective-dispersive solute transport equation. *Technical Bulletin*, **1661**.
- VERRUIJT A., 1970 — *Theory of groundwater flow*. Macmillan, London.
- WANG H.F., ANDERSON M., 1982 — *Introduction to groundwater modeling. Finite difference and finite element methods*. Academic Press Inc., San Diego.
- WFD WG GIS (Working Group 3.1 – GIS), 2003a — Guidance Document No. 9 – Implementing the Geographical Information System Elements (GIS) of the Water Framework Directive. Water Framework Directive (WFD) – Common Implementation Strategy.
URL: <http://www.ec-gis.org/docs/F2305/GIS-GD.pdf>.
- WFD WG GIS (Working Group 3.1 – GIS), 2003b — Policy Summary to Guidance Document No. 9 – Implementing the Geographical Information System Elements (GIS) of the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive.
URL: http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/guidance_documents/gds09sgisspolicysummary/_EN_1.0_&a=d.
- WOŚ A., 1996 — *Zarys klimatu Polski*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- YEN C.-C., GUYMON G., 1990 — An efficient deterministic – Probabilistic approach to modeling regional groundwater flow. 1. Theory. *Water Resour. Res.*, **26**, 7.
- ZHENG C., BENNETT G.D., 2002 — *Applied Contaminant Transport Modelling*. Wiley-Interscience, New York.
- ZIJL W., NAWALANY M., 1993 — *Natural Groundwater Flow*. Lewis Publishers, Boca Raton.

OBJAŚNIENIA SYMBOLI

$\Phi = \frac{p}{\rho g} + z$ – wysokość hydrauliczna [m]

p – ciśnienie [Pa]

ρ – gęstość wody wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami [kg/m^3]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

$\underline{q} = (q_x, q_y, q_z)$ – objętościowy strumień przepływu (*specific discharge*) – objętość wody przepływającej w ciągu 1 sekundy przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku przepływu; zwany też prędkością filtracji lub przepływem właściwym [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$]

$v_p = \frac{q}{n_{\text{ef}}}$ – prędkość porowa – średnia prędkość przemieszczania się cząstek wody w porach ośrodkach skalnego [m/s, m/h, m/d]

n_{ef} – współczynnik porowatości efektywnej ośrodka porowatego [–]

$\underline{\tilde{q}} = \rho \cdot \underline{q}$ – strumień masowy – masa wody przepływającej w ciągu 1 sekundy przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku przepływu [$\text{kg/s} \cdot \text{m}^2$]

$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t}$ – szybkość gromadzenia się wody w jednostce objętości ośrodka porowatego [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^3$]

S_s – współczynnik sprężystej pojemności wodnej właściwej (*specific storativity*) [1/m]

κ – współczynnik przepuszczalności [m^2]

μ – współczynnik lepkości dynamicznej wody [kg/m/s]

γ – ciężar właściwy wody [kg/m^3]

ν – lepkość kinematyczna wody [m^2/s]

$k = \kappa \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}$ – współczynnik filtracji [m/s]

$R_e = \frac{v_p \cdot d \rho}{\mu}$ – liczba Reynoldsa

v_p – średnia prędkość wody w porach ośrodka skalnego [m/s]

d – uśredniona średnica porów [m]

μ – współczynnik lepkości dynamicznej wody [kg/m/s]

ρ – gęstość wody [kg/m³]

$c = \frac{d_o}{k_o}$ – opór hydrauliczny osadów dennych [s]

d_o – miąższość osadów dennych [m]

k_o – współczynnik filtracji osadów dennych [m/s]

$S = S_s \cdot m$ – współczynnik pojemności wodnej (*storativity*) [–]

m – miąższość warstwy wodonośnej [m]

$T = k \cdot m$ – współczynnik przewodności hydraulicznej (*transmissibility*) [m²/s]

$R(x, y, t)$ – człon źródłowo-upustowy reprezentujący zasilanie warstwy wodonośnej przez strop lub/i spąg: dodatni – dla zasilania (źródło), ujemny – dla strat wody (upust) [m³/s·m²]

$Inf(x, y, t)$ – zasilanie infiltracyjne [m³/s·m²]

$s(x, y, t)$ – zasilanie warstwy wodonośnej (podsiąkanie/przesiákanie) przez spąg z sąsiedniej niżejległej warstwy wodonośnej: dodatnie – gdy warstwa jest zasilana przez spąg, ujemne – gdy następuje przesiąkanie do warstwy niżejległej [m³/s·m²]

$Q_k(t)$ – wydatek poboru w k -tej studni [m³/s]

$C(x, y, z, t)$ – stężenie substancji rozpuszczonej w wodzie [kg/m³]

$J_{adw}, J_{dyf}, J_{dysp}$ – strumień adwekcyjny, dyfuzyjny, dyspersyjny substancji rozpuszczonej w wodzie w odniesieniu do jednostki objętości przestrzeni [kg s⁻¹/m²]

$J_{adw}^*, J_{dyf}^*, J_{dysp}^*$ – strumień adwekcyjny, dyfuzyjny, dyspersyjny substancji rozpuszczonej w wodzie w odniesieniu do jednostki objętości wody [kg s⁻¹/m²]

D_d^o – współczynnik dyfuzji molekularnej [m²/s]

D_d^* – efektywny współczynnik dyfuzji [m²/s]

τ – współczynnik krętości [–]

D_{dysp}^* – współczynnik dyspersji [m²/s]

$D_h^* = D_d^* + D_{dysp}^*$ – współczynnik dyspersji hydrodynamicznej [m²/s]

s_{fc} – człon źródłowo-upustowy związany z procesami fizykochemicznymi [kg/m³H₂O/s]

K – współczynnik rozdziału substancji rozpuszczonej pomiędzy fazą ciekłą a fazą stałą [–]

SŁOWNIK PODSTAWOWYCH TERMINÓW

ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) – nazwa standardowego kodu, służącego do wymiany danych i informacji między systemami komputerowymi. Jest kodem 7-bitowym, wykorzystującym wartości binarne (stąd 2^7 daje zbiór 128 różnych znaków). Zbiór zawiera znaki alfanumeryczne, znak odstępu, znaki specjalne i znaki sterujące. Często jest błędnie nazywany formatem dla określenia pliku zawierającego zapis tekstowy. → **UTF-8**.

Część wód podziemnych (*groundwater body, body of groundwater*) – wyodrębniona objętość wody podziemnej w utworze wodonośnym lub w utworach wodonośnych. Pojęcie to jest najczęściej związane z RDW, jednak w pełni koresponduje z pojęciem „włożona bryła wodna”, stosowanym przez Gołąba (1959, 1964) jako „układ strumieni i rozdzielona na: obszar zasilania, drogi krążenia wód i obszar zbiorczy”. Tak rozumianą część wód podziemnych należy traktować, na podstawie analizy różnych publikacji, jako wyodrębniony fragment → **systemu przepływu wód podziemnych** (systemu krążenia) na zasadach hydrodynamicznych i stanowi on zbiór związanych ze sobą strumieni wody podziemnej. → **JCWPD**.

Dane (*data*, liczba poj.: *datum*) – **1.** jednostki informacji, pojedyncze fragmenty informacji. **D.** niezorganizowane nie stanowią informacji i często są bezużyteczne. **D.** zorganizowane są elementami informacji. Zorganizowanie **d.** może być jawne, np. w językach znacznikowych, lub niejawne, np. miejsce umieszczenia adresu na kopercie decyduje, czy jest to adres nadawcy, czy odbiorcy. **2.** fakty, statystyki, opinie i przewidywania zebrane z różnych wewnętrznych i zewnętrznych źródeł. Dane bez kontekstu są szumem (Nowicki, Staniszkis, 2002).

Dane geoprzestrzenne (*geospatial data*) – **1.** dane zdefiniowane przez informatykę, ale w odróżnieniu od innych rodzajów danych – odniesione do określonego miejsca (fragmentu przestrzeni), wyznaczające jego położenie względem Ziemi. **2.** dane przestrzenne dotyczące Ziemi i wszystkich obiektów przestrzennych z nią związanych (Gaździcki, 2001).

Dane przestrzenne (*spatial data*) – → **dane geoprzestrzenne**.

Diagram klas UML (*UML class diagram*) – jeden z podstawowych diagramów języka UML, którego zadaniem jest opisanie struktury danych w postaci agregatów nazwanych klasami, ich atrybutów, wzajemnych powiązań, ograniczeń dla poszczególnych elementów i innych komponentów obiektowych projektowanego systemu. Jest to diagram statycznej struktury danych i stanowi sformalizowany zapis modelu pojęciowego.

Dyskretyzacja – zamiana fizycznej przestrzeni ciągłej o wymiarowości od 1D do 4D, złożonej z nieskończonej liczby punktów z sąsiedztwem nieskończenie bliskim na przestrzeń dyskretną o takiej samej wymiarowości, złożonej ze skończonej liczby punktów z sąsiedztwem skończenie bliskim. Najczęściej punkty przestrzeni dyskretnej tworzą regularną siatkę o stałym kroku dyskretyzacji, często również dla wszystkich kierunków przestrzennych ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$). Punkty przestrzeni dyskretnej bywają nazywane węzłami. W przypadku siatki regularnej stosuje się nazwę grid. **D.** jest często mylona z $\rightarrow$ **teselacją**.

Geomatyka (*geomatics*) – **1.** dziedzina wiedzy i technologii zajmująca się zagadnieniami pozyskiwania, zbierania, utrzymywania, analizy, interpretacji, przesyłania i wykorzystania informacji geoprzestrzennej, czyli związanej z miejscem, którego położenie jest określone względem Ziemi. **2.** dyscyplina naukowo-techniczna zajmująca się pozyskiwaniem, analizowaniem, interpretowaniem, upowszechnianiem i praktycznym stosowaniem geoinformacji (Gaździcki, 2001).

Geometria wyróżnienia (*feature geometry*) – podzbiór atrybutów geoprzestrzennych $\rightarrow$ **wyróżnienia**, odnoszących się wyłącznie do tych cech, które zależą od przyjętego układu odniesienia lub odwzorowania (np. na różnych mapach świata kształt Antarktydy jest różny).

GML (*Geography Markup Language*) – aplikacja języka (metajęzyka) XML przeznaczona do kodowania geoinformacji w celu przesyłania jej pomiędzy różnymi systemami *on-line*, niezależnie od platformy sprzętowo-systemowej oraz od charakteru i technologii systemu GI. Obecna wersja 3.2 pozwala na zapis danych w wymiarowości przestrzennej 4D, co czyni ten język bardzo atrakcyjnym w zastosowaniach geologicznych.

Implementacyjny model pojęciowy (*implementational conceptual model*) – $\rightarrow$ **model pojęciowy** uwzględniający technologiczne środowisko, w którym będzie realizowana jego aplikacja, np. zapisany w formie schematu XML. **I.m.p.** powinien spełniać wymagania określonego standardu lub bardziej ogólnej specyfikacji.

Informacja (*information*) – **1.** dane komputerowe, zorganizowane i przedstawione w usystematyzowanej formie umożliwiającej zrozumienie ich podstawowego znaczenia. Związki pomiędzy **i.** i danymi wyjaśnia definicja danych. **2.** dane interpretowane w kontekście określonego celu (Nowicki, Staniszkis, 2002).

Informacja geoprzestrzenna (*geospatial information*) – **1.** informacja zdefiniowana przez informatykę, ale w odróżnieniu od innych rodzajów informacji odniesiona do określonego miejsca (fragmentu przestrzeni). Niezbędnymi składnikami **i.g.** są dane określające położenie tego miejsca względem Ziemi. **2.** informacja uzyskiwana w drodze interpretacji $\rightarrow$ **danych geoprzestrzennych** (Gaździcki, 2001).

JCWpd – jednolita część wód podziemnych jako woda wypełniająca fragment przestrzeni hydrogeologicznej na określonym obszarze. Kategoria ta ma znaczenie głównie przy określaniu stanu ilościowego i jakościowego wód podziemnych, a potrzeba ich wyodrębnienia podyktowana jest wymogami RDW. Prace prowadzone nad praktycznym zastosowaniem

RDW pozwalają przyjąć, że tak wyodrębniona → **część wód podziemnych** w większości przypadków nie jest jednolita, często składa się z mniejszych części, tworzących strukturę hierarchiczną.

Jednostka hydrogeologiczna (*hydrogeological unit*) – **1.** wyróżniający się fragment litosfery (grunt, osad lub skała) o znaczącej lub pomijalnej porowatości i przepuszczalności, przez to w istotny sposób wpływający na gromadzenie się i przepływ wód podziemnych (*EPA Dictionary – US Environmental Protection Agency*). **2.** fragment litosfery stanowiący przestrzennie i dynamicznie zdefiniowany → **system hydrogeologiczny** (Dowgiałło i in., red., 2002).

Jednostka hydrostratygraficzna (*hydrostratigraphic unit*, HSU) – **1.** termin wprowadzony przez Maxeya (1964) jako „przestrzeń skalna (fragment litosfery – przyp. autora) o wyraźnie poziomym rozprzestrzenieniu, która tworzy geologiczne środowisko dla określonego systemu wód”. Wyodrębnienie tej przestrzeni z otoczenia oparte jest nie tylko na charakterystyce litologicznej, ale także na zmienności parametrów, „które mają zastosowanie w szczególności do przepływu wody, jej występowania i magazynowania”. **J.h.** zdefiniowana w taki sposób nie jest związana z pojęciem jednostki stratygraficznej stosowanym w geologii, gdzie podstawą podziału jest wiek stratygraficzny zdefiniowany w tablicy stratygraficznej. **2.** w Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., red., 2002) pojęcie **j.h.** nie zostało zdefiniowane, lecz często występuje w definicjach innych pojęć – w takich przypadkach odnosi się do wieku utworów wodonośnych, np. „piętro wodonośne triasu”.

Klasa (*class*) – w informatyce: **1.** zbiór obiektów o zbliżonych własnościach. **2.** byt semantyczny rozumiany jako miejsce przechowywania takich cech grupy podobnych obiektów, które są dla nich niezmiennie (np. zestawu atrybutów, nazwy, metod, ograniczeń dostępu). **3.** wyrażenie językowe specyfikujące budowę obiektów, dozwolone operacje na obiektach, ograniczenia dostępu, wyjątki i inne. Zwykle **k.** wiąże się ze sobą poprzez hierarchię (lub inną strukturę) dziedziczenia (Subieta, 1999). **4.** w modelach geoinformacji (danych geoprzestrzennych): podstawowy element służący do definiowania typów → **wyróżnień**, które następnie są przekształcane na typy elementów języka XML (w tym przypadku → **GML**) lub na komponenty struktur w bazach danych. W języku → **UML k.** są definiowane i grupowane w → **diagramach klas UML**.

Krasowy system wodonośny (*karstic aquifer system*) – system wodonośny złożony z przepuszczalnych utworów porowatych (termin z zakresu podstawowego hydrogeologicznego modelu pojęciowego).

Metadane (*metadata*) – **1.** dane o danych. **2.** dane dotyczące zawartości, jakości, warunków i innych cech charakterystycznych zbioru danych. **3.** w odniesieniu do zbioru → **danych geoprzestrzennych** – dane o położeniu i rodzaju obiektów oraz ich atrybutów, pochodzeniu, dokładności, szczegółowości, aktualności, zastosowanych standardach, prawach własności i prawach autorskich (Gaździcki, 2001). **4.** wszelkie dane opisujące zawartość bazy danych: schemat, podschematy poszczególnych użytkowników, typy danych, opis seman-

tyki danych, opis rozmieszczenia i organizacji fizycznej danych, licznosci i statystyki dotyczące danych i ich wykorzystania, prawa dostępu do danych itd. (Subieta, 1999).

Model określonego miejsca (*site-specific model*) – → **model wyróżnienia**.

Model pojęciowy (*conceptual model*) – **1.** w informatyce: model procesów (funkcjonujących w systemie informatycznym) lub model struktury danych odwołujący się do ludzkiej percepcji i wyobraźni, mający za zadanie zrozumienie problemu, udokumentowanie wyniku analizy lub projektu w czytelnej i abstrakcyjnej formie językowej oraz ułatwienie komunikacji w zespołach ludzkich (Subieta, 1999). **2.** ogólnie: reprezentacja wybranych właściwości przestrzeni rozważań (*universe of discourse*) przy użyciu encji (klas lub typów wyróżnień) oraz zależności między nimi (Gaździcki, 2001). **3.** w geomatyce: model identyfikujący i definiujący typy zjawisk świata rzeczywistego (lub typy reprezentujących je wyróżnień przestrzennych) oraz typy występujących pomiędzy nimi zależności i powiązań. **4.** model, który definiuje pojęcia w → **przestrzeni rozważań** (*model that defines the concepts of a universe of discourse*). **5.** w hydrogeologii często terminem **m.p.** nazywa się niepoprawnie → **schemat warunków hydrogeologicznych**.

Model pojęciowy struktur danych (*conceptual model of data structures*) – model pojęciowy stanowiący podstawę programowania układu danych w określonym systemie z zastosowaniem wybranego języka programowania, np. XML, C++ lub SQL. W zakresie informacji przestrzennej (geoinformacji) dziedzinowe (tematyczne) modele pojęciowe zapisane w języku → **UML** stanowią podstawę opracowania dziedzinowych schematów aplikacyjnych języka → **GML**.

Model pojęciowy systemu hydrogeologicznego (*conceptual model of hydrogeological system*) – zbiór pojęć i ich wzajemnych powiązań, dotyczących komponentów → **systemu hydrogeologicznego**. **M.p.s.h.** jest głównym składnikiem → **podstawowego hydrogeologicznego modelu pojęciowego**.

Model semantyczny (*semantic model*) – zestaw pojęć, technik i notacji, mający na celu odwzorowanie semantyki danych, tzn. ich znaczenia w świecie zewnętrznym. **M.s.** wprowadza pojęcia: generalizacji, specjalizacji, asocjacji, agregacji, klasyfikacji, własności temporalnych, zdarzeń, własności behawioralnych itd. Przykładem prostego **m.s.** jest model encja–związek. Terminem **m.s.** określa się czasem konkretny diagram (lub inną formę językowo-graficzną) odwzorowującą rzeczywistość opisywaną przez dane (Subieta, 1999).

Modelowanie cyfrowe powierzchni (*digital surface modeling*) – wytwarzanie modelu powierzchni, np. powierzchni terenu, powierzchni spągu lub stropu warstw skalnych lub powierzchni granicznych warstw wodonośnych. Stosuje się tu odpowiednie sposoby zapisu danych – jest to najczęściej typ → **pokrycia macierzowego** (siatkowego, rastrowego).

Obiekt (*object*) – pojęcie wieloznaczne i często w hydrogeologii stosowane niepoprawnie. **1.** w polskich wersjach norm ISO 19100 – abstrakcja zjawisk występujących w świecie rzeczywistym. W tym znaczeniu stosuje się również termin → **wyróżnienie**. **2.** w teorii informacji –

konkretny lub abstrakcyjny byt (wystąpienie) wyróżnialny w modelowanej rzeczywistości, posiadający nazwę, jednoznaczną identyfikację, wyraźnie określone granice, atrybuty i inne właściwości, takie jak rodzaj struktury wewnętrznej lub struktury danych z nim związanych. Powyższe składniki określają jego stan (poprzez wartości atrybutów i powiązania) i zachowanie (poprzez operatory i funkcje, czyli metody). **3.** w geomatyce: wystąpienie klasy. Jest to definicja stworzona na podstawie paradygmatu obiektowości wywodzącego się z języka → **UML**, który przyjęto tu do opisu modeli pojęciowych. **4.** w kartografii: definicja **o.** jest zbliżona do potocznego rozumienia tego słowa, np. **o.** wojskowy, sportowy, turystyczny itp. W hydrogeologii **o.** można nazwać otwór wiertniczy lub ujęcie wody, jednak stosowanie tego terminu do utworów wodonośnych, poszczególnych izol linii lub części wód podziemnych jest niepoprawne i powinno być zastępowane terminem → **wyróżnienie**.

Podstawowy hydrogeologiczny model pojęciowy (*core conceptual hydrogeological model*) – zbiór podstawowych pojęć dotyczących → **systemu hydrogeologicznego** i opis ich wzajemnych relacji. Model ten stanowi istotną część paradygmatu hydrogeologii, jest podstawą → **schematu warunków hydrogeologicznych** i pozwala na systematyczne uporządkowanie informacji hydrogeologicznej.

Pokrycie (*coverage*) – dwu- lub czasem wyżejwymiarowa metafora dla zjawiska występującego na lub w pobliżu powierzchni Ziemi. W podstawowym znaczeniu pokrycia (i obrazy) pozwalają „zobaczyć” w *n* wymiarach (*n* wynosi zwykle 2, czasem 3 lub więcej) jakąś (zwykle bardziej złożoną) przestrzeń → **wyróżnienia geoprzestrzennego**. Zaletą **p.** jest możliwość modelowania i zobrazowania geoprzestrzennych relacji i geoprzestrzennego rozkładu zjawiska na Ziemi. **P.** jest szczególnym przypadkiem (lub podtypem) → **wyróżnienia**. W schemacie aplikacyjnym **p.** jest funkcją, która dokonuje projekcji domeny geoprzestrzennej do domeny atrybutów. Przykładami **p.** są: obraz rastrowy, powierzchnia zbudowana z wieloboków i macierzowy model powierzchni terenu lub powierzchni geologicznej. **P.** są często implementowane jako zbiór danych przypisanych do określonego atrybutu jako wartości związane z położeniem w ograniczonej przestrzeni (OGC, 1999).

Pokrycie geoprzestrzenne (*geospatial coverage*) – → **pokrycie**.

Pokrycie macierzowe (siatkowe, rastrowe); (*matrix coverages*) – forma danych przestrzennych typu → **pokrycie**, w której poszczególne dane są przypisane przestrzennie do punktów położonych na przecięciach linii siatki (do węzłów siatki). Otoczenie tych punktów, ograniczone liniami położonymi dokładnie w połowie pomiędzy liniami siatki, jest nazywane blokami. Najczęściej siatka jest kwadratowa i równoległa do osi przyjętego układu odniesienia.

Porowy system wodonośny (*porous aquifer system*) – system wodonośny złożony z przepuszczalnych utworów porowatych.

Przestrzeń rozważań (*universe of discourse*) – wg normy ISO 19101: przedstawienie rzeczywistego lub hipotetycznego świata, które zawiera wszystko to, co stanowi przedmiot zainteresowania.

Rozmyty (*fuzzy*) – obiekt, wyróżnienie, granica, atrybut (*object, feature, boundary, attribute*) – cecha obiektu, wyróżnienia lub atrybutu, których granice, atrybuty lub ich wartości nie są ostre (istnieje wyraźna niejednoznaczność dotycząca granic, atrybutów lub ich wartości). Przykładami mogą być: granica góry lub synkliny, pole temperatur powietrza lub objętość rzeki, pole hydrodynamiczne lub hydrochemiczne, strefa wahań zwierciadła wody lub wzniosu kapilarnego.

Schemat aplikacyjny GML (*GML application schema*) – rozszerzenie języka → **GML** o elementy specyficzne dla danej dziedziny lub społeczności. Potrzeba takiego rozszerzenia wynika z faktu, iż język → **GML** nie może być bezpośrednio stosowany do zapisu geoinformacji. Stanowi on jedynie podstawę do opracowania schematów aplikacyjnych, służących konkretnym zastosowaniom w określonych dziedzinach lub społecznościach. Reguły opracowania **s.a. GML** określa norma ISO 19103 i aneks E do normy ISO 19136. Przykładami **s.a. GML** są języki GeoSciML (*GeoSciences Markup Language*), GWML (*GroundWater Markup Language*) i specyfikacje danych tematów INSPIRE, w tym dla geologii i hydrogeologii.

Schemat pojęciowy (*conceptual schema*) – formalny opis → **modelu pojęciowego**. Najczęściej stosowanym formalnym językiem zapisu modeli pojęciowych jest język → **UML**.

Schemat warunków hydrogeologicznych (*scheme of groundwater conditions*) – sformalizowany opis warunków hydrogeologicznych. Formalizmem językowym może być w tym przypadku: format lub język zapisu danych geoprzestrzennych, tekst oparty na zdefiniowanym szablonie dla informacji opisowej i dane nieprzestrzenne ujęte w formę jednoznacznie określonych tabel, zapisane w formacie pozwalającym na dalsze przetwarzanie. **S.w.h.** nazywany jest także w literaturze hydrogeologicznej → **modelem pojęciowym**. Pojęcia te różnią się jednak od siebie zasadniczo. **S.w.h.** dotyczy konkretnego pojedynczego wystąpienia (bytu, egzemplarza), a model pojęciowy odnosi się do określonej kategorii, np. wszystkich w danej kategorii systemów wodonośnych lub wszystkich JCWPd.

Specyfikacja (*specification*) – **1.** abstrakcyjny opis bytu programistycznego (procedury, modułu, klasy, obiektu, bazy danych itp.) określający reguły użycia lub ustalający podstawowe założenia jego implementacji (Subieta, 1999). **2.** dokument lub opis, który określa w sposób kompletny, precyzyjny i sprawdzalny wymagania, projekt lub charakterystykę systemu lub jego fragmentu, często także procedury mające na celu określenie, czy wymagania zostały spełnione.

System hydrogeologiczny (*hydrogeological system*) – fragment przestrzeni hydrogeologicznej, zawierający wszystkie komponenty związane z występowaniem wody podziemnej. Komponenty te tworzą dwa najogólniejsze systemy składowe: → **system wodonośny** i → **system przepływu wód podziemnych**.

System krążenia wód podziemnych – → **system przepływu wód podziemnych**.

System przepływu wód podziemnych (system krążenia wód podziemnych) (*groundwater flow system*) – przestrzenny układ strumieni wód podziemnych w obrębie systemu wodonośnego (jednostki lub regionu hydrogeologicznego), traktowany jako całość, ograniczony ściśle zdefiniowanymi przestrzennie i hydrodynamicznie granicami, opisany siatką hydrodynamiczną.

System wodonośny (*aquifer system*) – **1.** zespół utworów wodonośnych znajdujących się w kontakcie hydraulicznym, ograniczony ściśle zdefiniowanymi przestrzennie i dynamicznie granicami. **2.** odpowiednik terminu formacja wodonośna. **3.** zbiornik wód podziemnych; wodozbiór, zbiorowisko wód podziemnych. **4.** w szerszym znaczeniu: zespół utworów do- brze- i słaboprzepuszczalnych, pozostających we wzajemnej łączności hydraulicznej (Dowgiałło i in., red., 2002).

Szczelinowy system wodonośny (*fractured aquifer system*) – system wodonośny złożony z przepuszczalnych utworów szczelinowych.

Teselacja – podział powierzchni na elementarne obszary, które są figurami określonego kształtu. Najczęściej są to kwadraty. W wyniku takiego podziału powstaje raster. Raster to uporządkowany zbiór komórek, które pokrywają część powierzchni, np. sieć kwadratów pokrywających część płaszczyzny i utworzonych przez dwie rodziny linii równoległych, równoodległych i wzajemnie prostopadłych; punkty przecięć tych linii tworzą węzły rastera, a zbiór tych węzłów nazywany jest gridem. W przestrzeni 3D elementami są bryły, najczęściej sześciiany, często nazywane blokami. **T.** jest często mylona z → **dyskretyzacją**, a elementy siatki są często błędnie nazywane pikselami (2D) lub vokselami (3D).

Topologia (*topology*) – **1.** w matematyce: dział badający te własności figur, które nie ulegają zmianom przy różnego rodzaju przekształceniach, np. przy wyginaniu lub kurczeniu się. **2.** w geomatyce: naukowe wyjaśnienie relacji pomiędzy połączonymi lub sąsiadującymi ze sobą punktami, liniami i obszarami, a szczególnie pomiędzy właściwościami obiektów, które się nie zmieniają podczas transformacji wynikających ze zmian odwzorowania (ISO/TC 211, 2002).

Topologia wyróżnienia (*feature topology*) – podzbiór atrybutów geoprzestrzennych wyróżnienia, odnoszących się wyłącznie do tych cech, które nie zależą od przyjętego układu odniesienia lub odwzorowania, np. Warszawa leży nad Wisłą, a jej dzielnica Praga na prawym brzegu tej rzeki. Zagadnieniami przynależności jednego wyróżnienia lub obiektu do innego jako części należącej do całości zajmuje się merologia (*merology*), a jeżeli ta przynależność ma sens przestrzenny – merotopologia (*merotopology*) (Smith, Mark, 1998).

UML (*Unified Modeling Language*) – pojęcia i notacje służące do obiektowej analizy, modelowania i projektowania, opracowane przez czołowych metodologów: G. Boocha, I. Jacobsona, J. Rumbaugh; rozpowszechniana przez firmę Rational Inc. **UML** jest następcą OMT – metodyki Boocha oraz metodyki opartej na przypadkach użycia (*use cases*) Jacobsona. **UML** jest lansowany jako standard notacyjny, również jako fragment standardu OMG (Subieta, 1999). Aktualnie najnowsza wersja **UML** 2.3 ukazała się w maju 2010. Język **UML** jest oficjalnie przyjęty przez OGC, ISO i INSPIRE jako standard do zapisu →

modeli pojęciowych danych geoprzestrzennych. Obok → **diagramów klas UML**, w geomatyce stosuje się także inne jego diagramy, np. diagramy pakietów lub obiektów, diagramy przypadków użycia i diagramy sekwencji.

Ustanowiony (*fiat*) obiekt, wyróżnienie, granica, atrybut (*object, feature, boundary, attribute*) – cecha obiektu, wyróżnienia, atrybutu, które nie są naturalnie wyodrębnialne z otaczającej je rzeczywistości. W geomatyce odnosi się to najczęściej do arbitralnego wyznaczenia granic, w oparciu o określoną hipotezę lub bez uwzględniania przesłanek wynikających z obserwacji (Smith, 2001). Przykładem może być terenowa jednostka administracyjna (gmina, powiat), granica zatoki od strony morza lub granice jednostki geologicznej lub hydrogeologicznej o charakterze ciągłym, np. monokliny lub zbiornika wód podziemnych. Przeciwnieństwem **u.** jest autentyczny (rzeczywisty, *genuine*).

UTF-8 (*UCS Transformation Format – 8-bit*) – komputerowy sposób kodowania z rodziny Unicode (*UCS – Universal Character Set*) znaków w plikach tekstowych. Teoretycznie umożliwia zapis znaków wszystkich języków świata. Jego podstawą jest 1 bajt – znaki z zestawu podstawowego określonego w kodzie → **ASCII** mają w tym kodzie taki wymiar. Znaki spoza tego zakresu są kodowane przy pomocy dwóch lub więcej bajtów, a pierwszy bajt określa dziedzinę znaku. Na przykład litery z zakresu → **ASCII** „A” i „a” są kodowane heksadecymalnie jako „#29” i „#3D”. Litery polskiego alfabetu nie należą do zakresu → **ASCII**, co wymaga zapisu dwubajtowego, np. „Ą” i „ą” są kodowane jako „#C4,#84” i „#C4,#85”. Objętość zapisu tekstu polskiego w kodzie **UTF-8** jest nieznacznie większa, niż w innych sposobach kodowania jednobajtowego.

Utwór nieprzepuszczalny (*aquiclude*) – 1. utwór praktycznie nieprzepuszczalny, izolator. 2. utwór praktycznie wodonieprzepuszczalny, bardzo dobrze i dobrze izolujący (Dowgiałło i in., red., 2002).

Utwór półprzepuszczalny (*aquitard*) – utwór bardzo słabo izolujący lub półizolujący w porównaniu do sąsiadujących utworów przepuszczalnych; mniej przepuszczalny. **U.p.** są np. gliny piaszczyste, mułki, piaski ilaste, a także utwory praktycznie nieprzepuszczalne o niewielkiej miąższości (Dowgiałło i in., red., 2002).

Utwór przepuszczalny (wodonosiec) (*aquifer*) – 1. utwór w strefie saturacji zdolny do przewodzenia i magazynowania wody wolnej; współczynniki filtracji poziomej k i pionowej k' wynoszą $>10^{-6}$ m/s. 2. geologiczne środowisko wód podziemnych, zdolne do gromadzenia wody wolnej oraz jej przewodzenia i oddawania (Dowgiałło i in., red., 2002).

Warstwa nieprzepuszczalna (*stratum aquiclude, stratum aquifuge*) – warstwa utworów o bardzo małej przepuszczalności, często uboga lub pozbawiona wody, o znacznym rozprzestrzenieniu i określonej miąższości. → **Utwór nieprzepuszczalny**.

Warstwa półprzepuszczalna (*stratum aquitard*) – warstwa utworów wodonośnych o małej przepuszczalności, znacznym rozprzestrzenieniu i określonej miąższości. → **Utwór półprzepuszczalny**.

Warstwa wodonośna (*stratum aquifer*) – warstwa utworów wodonośnych o dobrej przepuszczalności, znacznym rozprzestrzenieniu i określonej miąższości. → **Utwór przepuszczalny**.

Warunki hydrogeologiczne (*groundwater conditions*) – **1.** Słownik hydrogeologiczny (Dowgiałło i in., red., 2002) definiuje ten termin jako zespół cech charakteryzujących wody podziemne i środowisko ich występowania. **2.** na potrzeby Informatora: zbiór istotnych czynników kształtujących stan wód podziemnych w systemie hydrogeologicznym lub jego fragmencie. **W.h.** determinują podstawowe cechy wody podziemnej pod względem chemicznym (jakość wody i jej zmiany) i hydrodynamicznym (kierunki i wielkość przepływu wody, a w rezultacie jej zasoby). Czynniki kształtujące **w.h.** można podzielić zatem na te, które wpływają na jakość wody i te, które decydują o jej ilości. Inny podział czynników to naturalne i antropogeniczne. Ważnymi składnikami **w.h.** są czasowe tendencje zmian, zarówno w aspekcie chemicznym, jak i hydrodynamicznym.

Weryfikacja modelu matematycznego (*verification of simulation model*) – procedura polegająca na porównywaniu reakcji modelu na zadane wymuszenia z reakcjami systemu rzeczywistego i analizie zgodności między danymi generowanymi przez oba te układy. Zasadą jest to, że do **w.m.m.** wykorzystuje się inny zestaw danych, niż do identyfikacji (tarowania) modelu.

Wodonosiec – → **utwór przepuszczalny**.

Wodonośny system hydrostratygraficzny (*hydrostratigraphic aquifer system*) – → **system wodonośny** o warstwowej budowie, złożony z → **warstw wodonośnych**, → **warstw półprzepuszczalnych** i → **warstw nieprzepuszczalnych**.

Wyróżnienie (przestrzenne, geoprzestrzenne) (*spatial, geospatial feature*) – **1.** podstawowy fragment (atom) informacji geoprzestrzennej. Posiada atrybuty geoprzestrzenne (geometryczne i topologiczne), np. kształt, rozciągłość, położenie, relacje z innymi wyróżnieniami. Często pojęcie **w.** jest mylone z pojęciem obiekt. **W.** może być obiektem, ale nie musi nim być. Ponieważ w geomatyce wszystkie wyróżnienia są geoprzestrzenne, przymiotnik geoprzestrzenny jest na ogół pomijany i używa się krótszego terminu **w.** **2.** cyfrowa reprezentacja zjawiska (bytu) świata rzeczywistego lub jego abstrakcja w modelu pojęciowym. **W.** ma określone miejsce w przestrzeni i czasie, stanowiące jego atrybuty. **W.** może być prawie wszystko, co może być umieszczone w przestrzeni i czasie: stół, budynek, miasto, drzewo, fragment lasu, ekosystem, trasa przejazdu lub wyż atmosferyczny jako obszar wysokiego ciśnienia powietrza. **3.** abstrakcja zjawiska świata rzeczywistego. Termin **w.** może odnosić się do typu zjawiska lub jego konkretnego wystąpienia, np. „rzeka” i „Wisła”.

Wyróżnienie geoprzestrzenne (*geospatial feature*) – → **wyróżnienie**.

Wyróżnienie wektorowe (*vector feature*) – forma danych przestrzennych typu → **wyróżnienie** z odniesieniem przestrzennym zapisanym wektorowo, czyli przy pomocy współrzędnych w określonym układzie odniesienia. Wymiar wektorów opisujących geometrię **w.w.** zależy od wymiarowości przestrzeni odniesienia. Może to być punkt w 1D (jedna współrzędna),

2D (dwie współrzędne) lub 3D (trzy współrzędne), a także linia (prosta w 1D, krzywa w 2D lub 3D), powierzchnia (płaska w 2D i niepłaska w 3D) lub bryła w 3D. Dla geometrii bardziej złożonych niż punkt liczba współrzędnych zależy od liczby punktów określających tę formę geometryczną.

Złożony system wodonośny (*compound aquifer system*) – system wodonośny złożony z utworów przepuszczalnych różnych kategorii: porowych lub/i szczelinowych lub/i krasowych.

DODATEK A. SZABLON TEKSTU SPECYFIKACJI

Dodatek A.1. Proponowany spis treści, rycin, tabel i załączników części tekstowej specyfikacji warunków hydrogeologicznych JCWPd

Spis treści:

1. Wstęp (około x stron)	x
2. Charakterystyka ogólna JCWPd (około x stron)	x
3. Historia badań hydrogeologicznych (około x stron)	x
4. Wykaz opracowań hydrogeologicznych i materiałów źródłowych (około x stron)	x
5. Ogólna charakterystyka warunków hydrogeologicznych (wstęp około x stron)	x
5.1. Budowa geologiczna (około x stron)	x
5.2. Geomorfologia (około x stron)	x
5.3. Pokrycie terenu i jego użytkowanie (około x stron)	x
5.4. Hydrografia (około x stron)	x
5.5. Obszary chronione (około x stron)	x
5.6. Ogniska zanieczyszczeń (około x stron)	x
5.7. Użytkowanie JCWPd (około x stron)	x
6. Koncepcja schematu (wstęp około x stron).	x
6.1. Relacje z sąsiednimi JCWPd (około x stron)	x
6.2. Główne zbiorniki wód podziemnych w obszarze JCWPd (około x stron)	x
6.3. Poziomy wodonośne i ich zasięg (około x stron)	x
6.4. Zasilanie wód podziemnych (około x stron)	x
6.5. Relacje z wodami powierzchniowymi i drenaż wód podziemnych (około x stron).	x
6.6. Stan ilościowy JCWPd (około x stron)	x
6.7. Stan jakościowy JCWPd (około x stron)	x
6.8. Tendencje zmian stanu JCWPd (około x stron)	x
7. Opis danych cyfrowych charakterystyki szczegółowej (około x stron)	x
8. Szczegółowa charakterystyka warunków hydrogeologicznych (około x stron)	x

cd. dodatku A.1

9. Zalecenia dotyczące dalszych prac nad charakterystyką warunków (około x stron)	x
10. Podsumowanie (około x stron)	x
Literatura	x

Spis rycin:

Ryc. 1. (podpis ryciny i objaśnienia) Lokalizacja JCWPd nr XXX i jej otoczenie	x
Ryc. x. (podpis ryciny i objaśnienia)	x

Spis tabel

Tabela 1. (Tytuł tabeli i objaśnienia) Zestawienie opracowań hydrogeologicznych	x
Tabela x. (Tytuł tabeli i objaśnienia)	x

Spis załączników

Załącznik 1 (Tytuł załącznika i objaśnienia)
--

Po stronie tytułowej, druga strona zawiera część dokumentacyjną specyfikacji, w której powinny się znaleźć: tytuł, autorzy, data, temat, wykonawca, typ dokumentu, opis, format dokumentu, dostępność: publiczny/wewnętrzny, oznaczenie, powiązania i tabela zawierająca historię zmian.

DODATEK B. PRZYKŁADY DEFINICJI UKŁADU ETRS89/POLAND CS92

Wszelkie dane geoprzestrzenne w różnych formatach i o różnym zakresie tematycznym, dotyczące opisu schematów warunków hydrogeologiczny JCWPd, wymagają jednakowego układu odniesienia. Tu został przyjęty układ o międzynarodowej nazwie ETRS89/Poland CS92, określany także identyfikatorem EPSG: 2180. Poprawne zdefiniowanie tego układu w różnych zbiorach danych i w różnych systemach geoinformatycznych typu GIS jest niezbędnym warunkiem, aby ich przetwarzanie nie powodowało błędnej interpretacji współrzędnych lub innych podobnych problemów. W pewnych przypadkach wystarczy użyć innej nazwy układu i oprogramowanie może to traktować jako zupełnie inny układ, niezgodny z deklarowanym. Przykładami takich sytuacji są często stosowane w niektórych systemach nazwy „PUWG-92” lub „UWPP_1992”. Może to spowodować poważne problemy podczas przetwarzania danych, m.in. pracochłonne, a przez to trwające długo, przeliczanie współrzędnych w dużych zbiorach danych pomiędzy dwoma pozornie różnymi układami odniesienia. Ze względu na konieczność precyzyjnego deklarowania definicji układu odniesienia, poniżej są podane pełne poprawne definicje stosowane w różnych formatach zapisu danych i w różnych systemach geoinformatycznych (Butler i in., 2007).

Dodatek B.1. Zapis układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w formacie OGC WKT (Well Known Text)

```
PROJCS["ETRS89 / Poland CS92",  
  GEOGCS["ETRS89",  
    DATUM["European_Terrestrial_Reference_System_1989",  
      SPHEROID["GRS 1980",6378137,298.257222101,  
        AUTHORITY["EPSG","7019"]],  
      AUTHORITY["EPSG","6258"]],  
    PRIMEM["Greenwich",0,  
      AUTHORITY["EPSG","8901"]],  
    UNIT["degree",0.01745329251994328,  
      AUTHORITY["EPSG","9122"]],  
      AUTHORITY["EPSG","4258"]],  
    UNIT["metre",1,  
      AUTHORITY["EPSG","9001"]],  
    PROJECTION["Transverse_Mercator"],  
    PARAMETER["latitude_of_origin",0],  
    PARAMETER["central_meridian",19],  
    PARAMETER["scale_factor",0.9993],
```

cd. dodatku B.1

```

PARAMETER["false_easting",500000],
PARAMETER["false_northing",-5300000],
AUTHORITY["EPSG","2180"],
AXIS["y",EAST],
AXIS["x",NORTH]]

```

Dodatek B.2. Plik z rozszerzeniem .prj układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 dla ESRI ArcGIS Desktop (ESRI WKT – dla wszystkich danych zapisanych w formatach: Shapefile lub Feature Class – GeoDB)

```

PROJCS["ETRS89 / Poland CS92",
  GEOGCS["ETRS89",
    DATUM["D_ETRS_1989",
      SPHEROID["GRS_1980",6378137,298.257222101]],
    PRIMEM["Greenwich",0],
    UNIT["Degree",0.017453292519943295]],
  PROJECTION["Transverse_Mercator"],
  PARAMETER["latitude_of_origin",0],
  PARAMETER["central_meridian",19],
  PARAMETER["scale_factor",0.9993],
  PARAMETER["false_easting",500000],
  PARAMETER["false_northing",-5300000],
  UNIT["Meter",1]]

```

Dodatek B.3. Plik z rozszerzeniem .prj układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 ESRI ArcInfo Workstation (dla wszystkich danych zapisanych w formatach: GRID, coverage i TIN)

```

Projection  TRANSVERSE
Spheroid    GRS80
Units       METERS
Zunits      NO
Xshift      0.0
Yshift      0.0
Parameters
0.9993 /* scale factor at central meridian
19 0 0.0 /* longitude of central meridian
0 0 0.0 /* latitude of origin
500000.0 /* false easting (meters)
-5300000.0 /* false northing (meters)

```

Dodatek B.4. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w formacie USGS

```
[9, 0, (0.0, 0.0, 0.99929999999999997, 0.0, 19000000.0, 0.0,
500000.0, -5300000.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 8]
```

Dodatek B.5. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w formacie Proj4

```
+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9993 +x_0=500000 +y_0=-5300000 +ellps=GRS80 +units=m
+no_defs
```

Dodatek B.6. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w formacie Proj4js

```
Proj4js.defs["EPSG:2180"] = "+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9993 +x_0=500000 +y_0=-5300000
+ellps=GRS80 +units=m +no_defs";
```

Dodatek B.7. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w pliku Mapfile programu MapServer

```
PROJECTION
    "proj=tmerc"
    "lat_0=0"
    "lon_0=19"
    "k=0.9993"
    "x_0=500000"
    "y_0=-5300000"
    "ellps=GRS80"
    "units=m"
    "no_defs"
END
```

Dodatek B.8. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w skrypcie języka Python programu MapServer

```
from mapscript import mapObj,layerObj
wkt = "PROJCS[\"ETRS89 / Poland CS92\",GEOGCS[\"ETRS89\",
DATUM[\"European_Terrestrial_Reference_System_1989\",SPHEROID[\"GRS 1980\",
6378137,298.257222101,AUTHORITY[\"EPSG\",\"7019\"]],AUTHORITY[\"EPSG\",\"6258\"]],
PRIMEM[\"Greenwich\",0,AUTHORITY[\"EPSG\",\"8901\"]],UNIT[\"degree\",
0.01745329251994328,AUTHORITY[\"EPSG\",\"9122\"]],AUTHORITY[\"EPSG\",\"4258\"]],
```

cd. dodatku B.8

```
UNIT["metre",1,AUTHORITY["EPSG","9001"]],PROJECTION["Transverse_Mercator"],
PARAMETER["latitude_of_origin",0],PARAMETER["central_meridian",19],
PARAMETER["scale_factor",0.9993],PARAMETER["false_easting",500000],
PARAMETER["false_northing",-5300000],AUTHORITY["EPSG","2180"],
AXIS["y",EAST],AXIS["x",NORTH]]""
m = mapObj("")
m.setWKTProjection(wkt)
lyr = layerObj(m)
lyr.setWKTProjection(wkt)
```

**Dodatek B.9. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92
w pliku XML programu Mapnik**

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Map srs="+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9993 +x_0=500000
+y_0=-5300000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs">
  <Layer srs="+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9993 +x_0=500000
  +y_0=-5300000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs">
    </Layer>
  </Map>
```

**Dodatek B.10. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92
w skrypcie języka Python programu Mapnik**

```
from mapnik import Map, Layer
proj4 = '+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9993 +x_0=500000 +y_0=-5300000
+ellps=GRS80 +units=m +no_defs'
m = Map(256,256,proj4)
lyr = Layer('Name',proj4)
```

**Dodatek B.11. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92
w formacie programu GeoServer**

```
<featureType dataStore = "your_layer" >
<name>your_layer</name>
<SRS>2180</SRS>
<!-- remainder of featuretype info-->
</featureType>
```

Dodatek B.12. Polecenie INSERT dla układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 interfejsu PostGIS bazy danych PostgreSQL – "spatial_ref_sys"

```
INSERT into spatial_ref_sys
(srid, auth_name, auth_srid, proj4text, srtext)
values ( 92180, 'epsg', 2180, '+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19
+k=0.9993 +x_0=500000 +y_0=-5300000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs ',
'PROJCS["ETRS89 / Poland CS92",GEOGCS["ETRS89",
DATUM["European_Terrestrial_Reference_System_1989",
SPHEROID["GRS 1980",6378137,298.257222101,AUTHORITY["EPSG","7019"]],
AUTHORITY["EPSG","6258"]],
PRIMEM["Greenwich",0,AUTHORITY["EPSG","8901"]],
UNIT["degree",0.01745329251994328,
AUTHORITY["EPSG","9122"]],AUTHORITY["EPSG","4258"]],
UNIT["metre",1,AUTHORITY["EPSG","9001"]],
PROJECTION["Transverse_Mercator"],
PARAMETER["latitude_of_origin",0],
PARAMETER["central_meridian",19],
PARAMETER["scale_factor",0.9993],
PARAMETER["false_easting",500000],
PARAMETER["false_northing",-5300000],
AUTHORITY["EPSG","2180"],
AXIS["y",EAST],
AXIS["x",NORTH]]');
```

Dodatek B.13. Definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w języku skryptowym JSON

```
{'type': 'EPSG', 'properties': {'code': 2180}}
```

Dodatek B.14. Pełna szczegółowa definicja układu odniesienia ETRS89/Poland CS92 w języku GML

```
<gml:ProjectedCRS gml:id="ogrcrs20">
  <gml:srsName>ETRS89 / Poland CS92</gml:srsName>
  <gml:srsID>
    <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:crs:EPSG::">2180</gml:name>
  </gml:srsID>
  <gml:baseCRS>
    <gml:GeographicCRS gml:id="ogrcrs21">
      <gml:srsName>ETRS89</gml:srsName>
      <gml:srsID>
        <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:crs:EPSG::">4258</gml:name>
      </gml:srsID>
```

cd. dodatku B.14

```

<gml:usesEllipsoidalCS>
  <gml:EllipsoidalCS gml:id="ogrcrs22">
    <gml:csName>ellipsoidal</gml:csName>
    <gml:csID>
      <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:cs:EPSG::">
        6402
      </gml:name>
    </gml:csID>
    <gml:usesAxis>
      <gml:CoordinateSystemAxis gml:id="ogrcrs23"
        gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9102">
        <gml:name>Geodetic latitude</gml:name>
        <gml:axisID>
          <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:axis:EPSG::">
            9901
          </gml:name>
        </gml:axisID>
        <gml:axisAbbrev>Lat</gml:axisAbbrev>
        <gml:axisDirection>north</gml:axisDirection>
      </gml:CoordinateSystemAxis>
    </gml:usesAxis>
    <gml:usesAxis>
      <gml:CoordinateSystemAxis gml:id="ogrcrs24"
        gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9102">
        <gml:name>Geodetic longitude</gml:name>
        <gml:axisID>
          <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:axis:EPSG::">
            9902
          </gml:name>
        </gml:axisID>
        <gml:axisAbbrev>Lon</gml:axisAbbrev>
        <gml:axisDirection>east</gml:axisDirection>
      </gml:CoordinateSystemAxis>
    </gml:usesAxis>
  </gml:EllipsoidalCS>
</gml:usesEllipsoidalCS>
<gml:usesGeodeticDatum>
  <gml:GeodeticDatum gml:id="ogrcrs25">
    <gml:datumName>
      European_Terrestrial_Reference_System_1989
    </gml:datumName>
    <gml:datumID>
      <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:datum:EPSG::">
        6258
      </gml:name>
    </gml:datumID>
  </gml:GeodeticDatum>
</gml:usesGeodeticDatum>

```

```

</gml:name>
</gml:datumID>
<gml:usesPrimeMeridian>
  <gml:PrimeMeridian gml:id="ogrcrs26">
    <gml:meridianName>Greenwich</gml:meridianName>
    <gml:meridianID>
      <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:meridian:EPSG::">
        8901
      </gml:name>
    </gml:meridianID>
    <gml:greenwichLongitude>
      <gml:angle gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9102">
        0
      </gml:angle>
    </gml:greenwichLongitude>
  </gml:PrimeMeridian>
</gml:usesPrimeMeridian>
<gml:usesEllipsoid>
  <gml:Ellipsoid gml:id="ogrcrs27">
    <gml:ellipsoidName>GRS 1980</gml:ellipsoidName>
    <gml:ellipsoidID>
      <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:ellipsoid:EPSG::">
        7019
      </gml:name>
    </gml:ellipsoidID>
    <gml:semiMajorAxis gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">
      6378137
    </gml:semiMajorAxis>
    <gml:secondDefiningParameter>
      <gml:inverseFlattening
        gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9201">
          298.257222101
        </gml:inverseFlattening>
      </gml:secondDefiningParameter>
    </gml:Ellipsoid>
  </gml:usesEllipsoid>
</gml:GeodeticDatum>
</gml:usesGeodeticDatum>
</gml:GeographicCRS>
</gml:baseCRS>
<gml:definedByConversion>
  <gml:Conversion gml:id="ogrcrs28">
    <gml:usesMethod xlink:href="urn:ogc:def:method:EPSG::9807"/>
    <gml:usesParameterValue>

```

cd. dodatku B.14

```

    <gml:value gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9102">
      0
    </gml:value>
    <gml:valueOfParameter
      xlink:href="urn:ogc:def:parameter:EPSG::8801"/>
    </gml:usesParameterValue>
    <gml:usesParameterValue>
      <gml:value gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9102">19</gml:value>
      <gml:valueOfParameter
        xlink:href="urn:ogc:def:parameter:EPSG::8802"/>
      </gml:usesParameterValue>
    </gml:usesParameterValue>
      <gml:value gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">0.9993</gml:value>
      <gml:valueOfParameter
        xlink:href="urn:ogc:def:parameter:EPSG::8805"/>
      </gml:usesParameterValue>
    </gml:usesParameterValue>
      <gml:value gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">500000</gml:value>
      <gml:valueOfParameter
        xlink:href="urn:ogc:def:parameter:EPSG::8806"/>
      </gml:usesParameterValue>
    </gml:usesParameterValue>
      <gml:value gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">
        -5300000
      </gml:value>
      <gml:valueOfParameter
        xlink:href="urn:ogc:def:parameter:EPSG::8807"/>
      </gml:usesParameterValue>
    </gml:Conversion>
  </gml:definedByConversion>
  <gml:usesCartesianCS>
    <gml:CartesianCS gml:id="ogrcrs29">
      <gml:csName>Cartesian</gml:csName>
      <gml:csID>
        <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:cs:EPSG::">
          4400
        </gml:name>
      </gml:csID>
    </gml:usesAxis>
      <gml:CoordinateSystemAxis gml:id="ogrcrs30"
        gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">
        <gml:name>Easting</gml:name>
        <gml:axisID>
          <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:axis:EPSG::">

```

```
9906
  </gml:name>
</gml:axisID>
<gml:axisAbbrev>y</gml:axisAbbrev>
<gml:axisDirection>east</gml:axisDirection>
</gml:CoordinateSystemAxis>
</gml:usesAxis>
<gml:usesAxis>
  <gml:CoordinateSystemAxis gml:id="ogrcrs31"
gml:uom="urn:ogc:def:uom:EPSG::9001">
    <gml:name>Northing</gml:name>
    <gml:axisID>
      <gml:name gml:codeSpace="urn:ogc:def:axis:EPSG::">
        9907
      </gml:name>
    </gml:axisID>
    <gml:axisAbbrev>x</gml:axisAbbrev>
    <gml:axisDirection>north</gml:axisDirection>
  </gml:CoordinateSystemAxis>
</gml:usesAxis>
</gml:CartesianCS>
</gml:usesCartesianCS>
</gml:ProjectedCRS>
```

DODATEK C. SZABLON DLA METADANYCH

Zgodnie z zaleceniami technicznych dokumentów wykonawczych RDW i wymaganiami dokumentów dyrektywy INSPIRE zbiory danych przestrzennych dotyczących JCWPd i inne zbiory z zakresu hydrogeologii powinny być opisane przy pomocy rekordów metadanych zgodnie z wymaganiami norm ISO 19115 i 19139. Wskazane jest także, aby te zapisy uwzględniały przyjęty w Unii Europejskiej profil INSPIRE. Poniżej przedstawiony jest przykład zapisu metadanych w języku XML zgodny z tymi wymaganiami. Fragmenty zapisu tekstem pogrubionym prostym są dla wszystkich rekordów dotyczących JCWPd niezmiennie lub podane w poprawnej formie, a zapisane tekstem pogrubionym pochyłym wymagają wstawienia na te miejsca odpowiednich tekstów, w zależności od właściwości poszczególnych opisywanych zbiorów danych.

Dodatek C.1. Szablon rekordu metadanych w języku XML dla zbioru danych JCWPd

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<MD_Metadata uuid="1e351595-6968-4198-b0ff-447f110422bb"
xmlns="http://www.isotc211.org/2005/gmd" xmlns:gco="http://www.isotc211.org/2005/gco"
xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink" xmlns:srv="http://www.isotc211.org/2005/srv"
xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml/3.2" xmlns:gts="http://www.isotc211.org/2005/gts"
xmlns:gmw="http://www.isotc211.org/2005/gmw">
  <fileIdentifier>
    <gco:CharacterString>1e351595-6968-4198-b0ff-447f110422bb</gco:CharacterString>
  </fileIdentifier>
  <language>
    <LanguageCode codeListValue="pol" codeList="LanguageCode">polski</LanguageCode>
  </language>
  <characterSet>
    <MD_CharacterSetCode codeListValue="utf8"
      codeList="MD_CharacterSetCode">utf8</MD_CharacterSetCode>
  </characterSet>
  <hierarchyLevel>
    <MD_ScopeCode codeListValue="dataset" codeList="MD_ScopeCode">
      Zbiór danych przestrzennych</MD_ScopeCode>
  </hierarchyLevel>
  <contact>
    <CI_ResponsibleParty>
      <organisationName>
```

```

    <gco:CharacterString>
      Tu należy wpisać nazwę i adres instytucji prowadzącej ten rejestr metadanych
    </gco:CharacterString>
  </organisationName>
</CI_ResponsibleParty>
</contact>
<dateStamp>
  <gco:DateTime>
    Tu należy wpisać datę i godzinę zapisu metadanych,
    na przykład: 2010-12-14T17:23:11</gco:DateTime>
  </dateStamp>
<referenceSystemInfo>
  <MD_ReferenceSystem>
    <referenceSystemIdentifier>
      <RS_Identifier>
        <code>
          <gco:CharacterString>2180</gco:CharacterString>
        </code>
        <codeSpace>
          <gco:CharacterString>EPSG</gco:CharacterString>
        </codeSpace>
      </RS_Identifier>
    </referenceSystemIdentifier>
  </MD_ReferenceSystem>
</referenceSystemInfo>
<metadataStandardName>
  <gco:CharacterString>INSPIRE</gco:CharacterString>
</metadataStandardName>
<metadataStandardVersion>
  <gco:CharacterString>1.1</gco:CharacterString>
</metadataStandardVersion>
<identificationInfo>
  <MD_DataIdentification>
    <citation>
      <CI_Citation>
        <title>
          <gco:CharacterString>
            Tu należy wpisać nazwę (tytuł) zasobu (zbioru danych)
          </gco:CharacterString>
        </title>
        <identifier>
          <MD_Identifier>
            <code>
              <gco:CharacterString>
                Tu należy wpisać niepowtarzalny identyfikator zasobu, na przykład:
                PL.PSH.JCWPd:550e8400-e29b-41d4-a716-446655440000
              </gco:CharacterString>
            </code>
          </MD_Identifier>
        </identifier>
      </CI_Citation>
    </citation>
  </MD_DataIdentification>
</identificationInfo>

```

cd. dodatku C.1

```

        </gco:CharacterString>
    </code>
</MD_Identifier>
</identifier>
</CI_Citation>
</citation>
<abstract>
    <gco:CharacterString>
        Tu należy wstawić opis zbioru danych (streszczenie)
    </gco:CharacterString>
</abstract>
<pointOfContact>
    <CI_ResponsibleParty>
        <organisationName>
            <gco:CharacterString>
                Tu należy wpisać nazwę i adres instytucji prowadzącej repozytorium zbiorów danych o JCWPd
            </gco:CharacterString>
        </organisationName>
    </CI_ResponsibleParty>
</pointOfContact>
<descriptiveKeywords>
    <MD_Keywords>
        <keyword>
            <gco:CharacterString>
                Tu należy wpisać słowa kluczowe dotyczące zasobu (zbioru danych)
            </gco:CharacterString>
        </keyword>
        <thesaurusName>
            <CI_Citation>
                <title>
                    <gco:CharacterString>
                        Tu należy podać nazwę tezauryśa słów kluczowych
                    </gco:CharacterString>
                </title>
            </CI_Citation>
        </thesaurusName>
    </MD_Keywords>
</descriptiveKeywords>
<resourceConstraints>
    <MD_Constraints xsi:type="MD_LegalConstraints_Type"
        xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
        <accessConstraints>
            <MD_RestrictionCode codeListValue="intellectualPropertyRights"
                codeList="MD_RestrictionCode">

```

Tu należy wpisać rodzaj ograniczenia dotyczącego dostępu, na przykład:
Prawa własności intelektualne

```
</MD_RestrictionCode>
</accessConstraints>
<accessConstraints>
  <MD_RestrictionCode codeListValue="otherRestrictions"
    codeList="MD_RestrictionCode">
```

Tu należy wpisać inne ograniczenia dotyczące dostępu, na przykład:
Inne ograniczenia

```
</MD_RestrictionCode>
</accessConstraints>
<otherConstraints>
  <gco:CharacterString>
    Tu należy wpisać, jakie są inne ograniczenia dostępu
  </gco:CharacterString>
</otherConstraints>
</MD_Constraints>
</resourceConstraints>
<resourceConstraints>
  <MD_Constraints xsi:type="MD_SecurityConstraints_Type"
    xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
    <classification>
      <MD_ClassificationCode codeListValue="unclassified"
        codeList="MD_ClassificationCode">Niesklasyfikowany
      </MD_ClassificationCode>
    </classification>
  </MD_Constraints>
</resourceConstraints>
<resourceConstraints>
  <MD_Constraints>
    <useLimitation>
      <gco:CharacterString>
        Tu należy podać warunki użytkowania
      </gco:CharacterString>
    </useLimitation>
  </MD_Constraints>
</resourceConstraints>
<spatialResolution>
  <MD_Resolution>
    <distance>
      <gco:Distance uom="m">
        Tu należy podać rozdzielczość przestrzenną danych w metrach,
        na przykład 10.0
      </gco:Distance>
    </distance>
  </MD_Resolution>
</spatialResolution>
```

cd. dodatku C.1

```

<language>
  <LanguageCode codeListValue="pol"
    codeList="LanguageCode">polski</LanguageCode>
</language>
<spatialRepresentationType>
  <MD_SpatialRepresentationTypeCode codeListValue="grid"
    codeList="MD_SpatialRepresentationTypeCode">
    Tu należy podać przestrzenną reprezentację danych (format),
    na przykład: grid, vector, textTable lub inny
  </MD_SpatialRepresentationTypeCode>
</spatialRepresentationType>
<characterSet>
  <MD_CharacterSetCode codeListValue="utf8"
    codeList="MD_CharacterSetCode">utf8</MD_CharacterSetCode>
</characterSet>
<topicCategory>
  <MD_TopicCategoryCode>geoscientificInformation</MD_TopicCategoryCode>
</topicCategory>
<extent>
  <EX_Extent>
    <geographicElement>
      <EX_GeographicBoundingBox>
        <westBoundLongitude>
          <gco:Decimal>
            Tu należy podać zasięg przestrzenny na zachód w stopniach dziesiętnych,
            na przykład 21.10
          </gco:Decimal>
        </westBoundLongitude>
        <eastBoundLongitude>
          <gco:Decimal>
            Tu należy podać zasięg przestrzenny na wschód w stopniach dziesiętnych,
            na przykład 22.34
          </gco:Decimal>
        </eastBoundLongitude>
        <southBoundLatitude>
          <gco:Decimal>
            Tu należy podać zasięg przestrzenny na południe w stopniach dziesiętnych,
            na przykład 50.28
          </gco:Decimal>
        </southBoundLatitude>
        <northBoundLatitude>
          <gco:Decimal>
            Tu należy podać zasięg przestrzenny na północ w stopniach dziesiętnych,
            na przykład 51.39
          </gco:Decimal>
        </northBoundLatitude>
      </EX_GeographicBoundingBox>
    </geographicElement>
  </EX_Extent>
</extent>

```

```

</geographicElement>
<temporalElement>
  <EX_TemporalExtent>
    <extent>
      <gml:TimeInstant>
        gml:id="ID-461dd9da-579b-41cf-9786-e0215a543264">
          <gml:timePosition frame="#ISO-8601">
            Tu należy podać pozycję w czasie (datę), dla jakiej dane w zasobie są aktualne
          </gml:timePosition>
        </gml:TimeInstant>
      </extent>
    </EX_TemporalExtent>
  </temporalElement>
<temporalElement>
  <EX_TemporalExtent>
    <extent>
      <gml:TimePeriod>
        gml:id="ID-b4194c3a-3e7e-41ae-b39f-73492d5a595b">
          <gml:beginPosition frame="#ISO-8601">
            Tu można podać pozycję w czasie (geologicznym), początku okresu, jakiego dane dotyczą, na przykład:  

Phanerozoic / Cenozoic / Quaternary / Pleistocene
          </gml:beginPosition>
          <gml:endPosition frame="#ISO-8601">
            Tu można podać pozycję w czasie (geologicznym), końca okresu, jakiego dane dotyczą, na przykład:  

Phanerozoic / Cenozoic / Quaternary / Holocene
          </gml:endPosition>
        </gml:TimePeriod>
      </extent>
    </EX_TemporalExtent>
  </temporalElement>
</EX_Extent>
</extent>
</MD_DataIdentification>
</identificationInfo>
<distributionInfo>
  <MD_Distribution>
    <transferOptions>
      <MD_DigitalTransferOptions>
        <onLine>
          <CI_OnlineResource>
            <linkage>
              <URL>

```

cd. dodatku C.1

*Tu należy podać lokalizator zasobu, jeżeli zasób (zbiór danych)
jest dostępny w internecie, na przykład:*

http://www.psh.gov.pl/plik/id,5183,v,artykul_3543.pdf

```

        </URL>
      </linkage>
    </CI_OnlineResource>
  </onLine>
</MD_DigitalTransferOptions>
</transferOptions>
</MD_Distribution>
</distributionInfo>
<dataQualityInfo>
  <DQ_DataQuality>
    <scope>
      <DQ_Scope>
        <level>
          <MD_ScopeCode codeListValue="dataset" codeList="MD_ScopeCode">
            Zbiór danych przestrzennych
          </MD_ScopeCode>
        </level>
      </DQ_Scope>
    </scope>
    <report>
      <DQ_DomainConsistency>
        <result>
          <DQ_ConformanceResult>
            <specification>
              <CI_Citation>
                <title>
                  <gco:CharacterString>
                    Tytuł specyfikacji danych, z którą zbiór jest zgodny
                  </gco:CharacterString>
                </title>
              </CI_Citation>
            </specification>
            <explanation gco:nilReason="inapplicable"/>
            <pass>
              <gco:Boolean>true</gco:Boolean>
            </pass>
          </DQ_ConformanceResult>
        </result>
      </DQ_DomainConsistency>
    </report>
  </lineage>
</LI_Lineage>

```

cd. dodatku C.1

```
<statement>
  <gco:CharacterString>
    Tu należy wpisać pochodzenie zasobu (zbioru danych)
  </gco:CharacterString>
</statement>
</LI_Lineage>
</lineage>
</DQ_DataQuality>
</dataQualityInfo>
</MD_Metadata>
```