



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy  
państwowa służba geologiczna



Ministerstwo  
Klimatu i Środowiska

## Ocena możliwości lokalizowania magazynów ciepła w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)

### Finansujący:

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej  
ul. Konstruktorska 3A, 02-673 Warszawa



Sfinansowano ze środków  
**NARODOWEGO FUNDUSZU  
OCHRONY ŚRODOWISKA  
i GOSPODARKI WODNEJ**

### Wykonawca:

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



### Opracował zespół pod kierunkiem:

mgr Mateusz Żeruń

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

Warszawa, 2024

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa  
tel. (+48) 22 45 92 000, [biuro@pgi.gov.pl](mailto:biuro@pgi.gov.pl)

Sąd Rejonowy dla m. st. Warszawy w Warszawie  
XIII Wydział Gospodarczy KRS, Nr 0000122099  
NIP 525-000-80-40



# Ocena możliwości lokalizowania magazynów ciepła w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)

---

Pod redakcją merytoryczną

Mateusza Żerunia, Ewy Jagody, Edyty Majer, Grzegorza Ryżyńskiego



Sfinansowano ze środków  
**NARODOWEGO FUNDUSZU  
OCHRONY ŚRODOWISKA  
i GOSPODARKI WODNEJ**

Warszawa 2024

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy



Redakcja merytoryczna: Mateusz ŻERUŃ, Ewa JAGODA, Edyta MAJER, Grzegorz RYŻYŃSKI

Zespół autorski: Mateusz ŻERUŃ<sup>1</sup>, Ewa JAGODA<sup>1</sup>, Edyta MAJER<sup>1</sup>, Grzegorz RYŻYŃSKI<sup>1</sup>, Marta SZLASA<sup>1</sup>, Kajetan WCZELIK<sup>1</sup>, Krzysztof MAJER<sup>1</sup>, Przemysław PLUTA<sup>1</sup>, Jakub JABŁOŃSKI<sup>1</sup>, Paula STEFAŃSKA<sup>1</sup>, Katarzyna BONIEWSKA<sup>1</sup>, Przemysław WOJTASZEK<sup>1</sup>, Jakub KOBIELA<sup>1</sup>, Przemysław SOBÓTKA<sup>1</sup>, Anna STAWICKA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

Współpraca: Tomasz ŚLIWA<sup>2</sup>, Aneta SAPIŃSKA-ŚLIWA<sup>2</sup>, Marek HAJTO<sup>3</sup>, Bartłomiej CIAPAŁA<sup>3</sup>, Leszek PAJAŁK<sup>3</sup>, Jerzy WOŁOSZYN<sup>4</sup>, Maciej MIECZNIK<sup>5</sup>, Bogusław BIELEC<sup>5</sup>, Magdalena TYSZER<sup>5</sup>, Karol PIERZCHAŁA<sup>5</sup>, Barbara TOMASZEWSKA<sup>5</sup>, Kamil KWIATKOWSKI<sup>6</sup>, Tomasz WALCZAK<sup>6</sup>

<sup>2</sup> Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, ul. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

<sup>3</sup> Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, ul. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

<sup>4</sup> Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, ul. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

<sup>5</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. J. Wybickiego 7A, 31-261, Kraków

<sup>6</sup> Euros Energy sp. z o. o., ul. Macieja Rataja 4f, 05-850, Koprki

Recenzenci: Piotr ZAWRZYKRAJ

Copyright © by Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa 2024



## SPIS TREŚCI

<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>11</b>
<b>2. PRZEGLĄD LITERATURY W ZAKRESIE MAGAZYNÓW CIEPŁA (STAN NA 31.03.2024).....</b>	<b>13</b>
<b>3. CHARAKTERYSTYKA I PODZIAŁ MAGAZYNÓW CIEPŁA.....</b>	<b>22</b>
3.1. BTES. OTWOROWE MAGAZYNY CIEPŁA.....	24
3.2. PTES. MAGAZYNY CIEPŁA W SPECJALNIE WYKONANYCH ZBIORNIKACH PRZYPOWIERZCHNIOWYCH ..	27
3.3. TTES. MAGAZYNY CIEPŁA W SPECJALNIE WYKONANYCH ZBIORNIKACH PODZIEMNYCH.....	31
3.4. EF(TG). FUNDAMENTY ENERGETYCZNE, GEOTECHNICZNE KONSTRUKCJE TERMOAKTYWNE.....	34
3.5. CHARAKTERYSTYKA PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA .....	38
<b>4. PRZEGLĄD KRAJOWYCH I ZAGRANICZNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA.....</b>	<b>40</b>
4.1. OTWOROWE MAGAZYNY CIEPŁA - BTES.....	40
4.1.1. <i>Wybrane doświadczenia zagraniczne .....</i>	<i>40</i>
4.1.1.1. Emmaboda, Szwecja.....	40
4.1.1.2. Paskov, Czechy .....	44
4.1.1.3. Brødstrup, Dania.....	46
4.1.2. <i>Wybrane doświadczenia krajowe.....</i>	<i>49</i>
4.1.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości.....	49
4.1.2.2. Sulejówek – Muzeum Marszałka Józefa Piłsudskiego .....	55
4.1.2.3. Zwoleń – budynek wielorodzinny .....	61
4.1.2.4. Kraków - Laboratorium Geoenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie .....	64
4.2. MAGAZYNY CIEPŁA W SPECJALNIE WYKONANYCH ZBIORNIKACH PRZYPOWIERZCHNIOWYCH – PTES .....	71
4.2.1. <i>Wybrane doświadczenia zagraniczne .....</i>	<i>71</i>
4.2.1.1. Dronninglund, Dania .....	71
4.2.1.2. Eggenstein-Leopoldshafen, Niemcy.....	74
4.2.1.3. Marstal 2 (Sunstore 4), Dania.....	76
4.2.2. <i>Wybrane doświadczenia krajowe.....</i>	<i>79</i>
4.2.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości.....	79
4.3. MAGAZYNY CIEPŁA W SPECJALNIE WYKONANYCH ZBIORNIKACH PODZIEMNYCH – TTES .....	80
4.3.1. <i>Wybrane doświadczenia zagraniczne .....</i>	<i>80</i>
4.3.1.1. Freidrichshafen, Niemcy .....	80
4.3.1.2. Monachium, Niemcy .....	81
4.3.1.3. Hannover Kronsberg, Niemcy .....	84
4.3.2. <i>Wybrane doświadczenia krajowe.....</i>	<i>86</i>
4.3.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości.....	86
4.4. FUNDAMENTY ENERGETYCZNE – EF(TG) .....	86
4.4.1. <i>Wybrane doświadczenia zagraniczne .....</i>	<i>86</i>
4.4.1.1. Zürich, Szwajcaria .....	86
4.4.1.2. Stuttgart-Fasenhof, Niemcy.....	88

4.4.1.3.	Bregencja, Austria .....	90
4.4.2.	<i>Wybrane doświadczenia krajowe</i> .....	92
4.4.2.1.	Kraków – Archiwum Narodowe .....	92
<b>5.</b>	<b>UWARUNKOWANIA PRAWNE DOTYCZĄCE MAGAZYNÓW CIEPŁA (STAN NA 30.09.2024)</b>	
	<b>97</b>	
5.1.	PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE CIEPŁA W PRAWODAWSTWIE .....	97
5.2.	PROCEDURY PRAWNO-ADMINISTRACYJNE .....	98
5.2.1.	<i>Otworowe magazyny ciepła - BTES</i> .....	98
5.2.2.	<i>Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych /podziemnych (PTES/TTES)</i> .....	99
5.2.3.	<i>Fundamenty energetyczne, geotechniczne konstrukcje termiczne (EF (TG))</i> .....	101
5.3.	IDENTYFIKACJA LUK W ZAKRESIE KOMPLEKSOWEJ REGULACJI PRZEPISÓW W ZAKRESIE MAGAZYNÓW CIEPŁA .....	101
<b>6.</b>	<b>KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI MAGAZYNÓW CIEPŁA .....</b>	<b>103</b>
6.1.	ADMINISTRACYJNO-PRAWNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	104
6.2.	GEOLOGICZNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	104
6.3.	TECHNICZNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	105
6.4.	EKONOMICZNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	106
6.5.	ŚRODOWISKOWE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	106
6.6.	SPOŁECZNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	107
6.7.	POLITYCZNE KRYTERIA DO OCENY LOKALIZACJI .....	107
<b>7.</b>	<b>CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNYCH KRYTERIÓW DO OCENY LOKALIZACJI PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA .....</b>	<b>107</b>
7.1.	SPADKI POWIERZCHNI TERENU .....	109
7.2.	FORMA GEOMORFOLOGICZNA .....	110
7.3.	NIEKORZYSTNE ZJAWISKA I PROCESY GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE .....	112
7.4.	DOSTĘPNOŚĆ ZŁÓŻ KOPALIN .....	114
7.5.	SEZONOWE WAHANIA ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH .....	115
7.6.	JEDNORODNOŚĆ OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO .....	115
7.7.	ZWIERCALNOŚĆ GRUNTÓW I SKAŁ .....	116
7.8.	URABIALNOŚĆ GRUNTÓW I SKAŁ .....	118
7.9.	PROCENTOWY UDZIAŁ UTWORÓW O WYSOKIM RYZYKU PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH O DUŻEJ PRĘDKOŚCI .....	119
7.10.	PRZEWODNOŚĆ TERMICZNA GRUNTÓW I SKAŁ .....	121
7.11.	OBJĘTOŚCIOWA POJEMNOŚĆ CIEPLNA GRUNTÓW I SKAŁ .....	122
7.12.	PRZYDATNOŚĆ PODŁOŻA DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA .....	123
7.13.	PRZYDATNOŚĆ GRUNTÓW I SKAŁ Z WYKOPÓW DO WBUDOWANIA W NASYP .....	124
7.14.	GŁĘBOKOŚĆ DO PIERWSZEGO NAWIERCONEGO ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH .....	126
7.15.	STOPIEŃ ROZPOZNANIA TERENU .....	127
<b>8.</b>	<b>METODYKA OCENY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA .....</b>	<b>127</b>
8.1.	PRZEGLĄD LOKALIZACJI .....	130
8.2.	WYBÓR LOKALIZACJI .....	133
8.3.	WSTĘPNA CHARAKTERYSTYKA LOKALIZACJI .....	138
8.3.1.	<i>Przegląd danych archiwalnych</i> .....	139
8.3.2.	<i>Przetwarzanie danych</i> .....	140
8.3.3.	<i>Opis i ocena lokalizacji</i> .....	143
8.3.4.	<i>Ranking lokalizacji</i> .....	160
8.3.4.1.	Uproszczony ranking lokalizacji na podstawie przyjętych założeń .....	160

8.3.4.2.	Ranking lokalizacji z wykorzystaniem algorytmu obliczeniowego .....	162
8.4.	SZCZEGÓŁOWA CHARAKTERYSTYKA LOKALIZACJI .....	165
8.5.	BADANIA LOKALIZACYJNE .....	165
8.5.1.	<i>Zebranie i przegląd danych archiwalnych</i> .....	166
8.5.2.	<i>Wizja terenowa</i> .....	167
8.5.3.	<i>Badania wstępne</i> .....	169
8.5.4.	<i>Badania szczegółowe</i> .....	170
8.6.	PROWADZENIE BAZY DANYCH W ZAKRESIE OCENY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA.....	171
<b>9.</b>	<b>TERMINOLOGIA .....</b>	<b>172</b>
9.1.	SŁOWNIK TERMINÓW.....	172
9.2.	SPIS SKRÓTÓW I SYMBOLI.....	174
<b>10.</b>	<b>SPIS WYKORZYSTANYCH MATERIAŁÓW.....</b>	<b>175</b>
10.1.	AKTY PRAWNE (STAN NA 30.09.2024 R.).....	175
10.2.	NORMY.....	175
10.3.	LITERATURA.....	176
10.4.	STRONY INTERNETOWE .....	187
<b>11.</b>	<b>SPIS RYSUNKÓW.....</b>	<b>188</b>
<b>12.</b>	<b>SPIS TABEL .....</b>	<b>192</b>



## 1. Wprowadzenie

W kontekście globalnych wyzwań związanych z transformacją energetyczną oraz koniecznością redukcji emisji gazów cieplarnianych, technologie magazynowania ciepła zyskują coraz większe znaczenie. Podziemne magazyny ciepła stanowią jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań w zakresie efektywnego zarządzania energią ciepłą, zarówno na potrzeby indywidualne, jak i systemów ciepłowniczych. Dodatkowo ich zastosowanie umożliwia lepsze zagospodarowanie nadwyżek energii cieplnej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz ciepła odpadowego generowanego przez przemysł i inne procesy technologiczne. Dzięki tym możliwościom podziemne magazyny ciepła stanowią kluczowy element integracji OZE z systemami energetycznymi, przyczyniając się do stabilizacji dostaw energii oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych.

W Unii Europejskiej ciepło stanowi znaczną część miksu energetycznego<sup>1</sup>, odpowiadając za około 50% całkowitego zużycia energii finalnej. W sektorach takich jak budownictwo, przemysł czy transport, energia cieplna odgrywa kluczową rolę, co podkreśla konieczność efektywnego jej wykorzystania i magazynowania. Jednocześnie rosnące zobowiązania międzynarodowe, takie jak Europejski Zielony Ład, wyznaczają ambitne cele w zakresie redukcji emisji gazów cieplarnianych i zwiększenia udziału OZE w miksie energetycznym. Polska, jako sygnatariusz tych porozumień, zobowiązała się do osiągnięcia co najmniej 32% udziału energii odnawialnej w końcowym zużyciu energii brutto do 2030 roku oraz znacznego obniżenia emisji gazów cieplarnianych w sektorze energetycznym i przemysłowym. Realizacja tych celów wymaga wdrażania innowacyjnych rozwiązań technologicznych, takich jak podziemne magazyny ciepła, które umożliwiają efektywne zarządzanie nadwyżkami energii z OZE oraz optymalizację wykorzystania ciepła odpadowego.

Podziemne magazyny ciepła (ang. Underground Thermal Energy Storage, UTES) to rodzaj infrastruktury energetycznej przeznaczony do akumulacji i przechowywania ciepła i chłodu w górotworze (również: ośrodek gruntowo-skalny, podłoże, podłoże gruntowe) oraz wykorzystania ciepła i chłodu. Proces podziemnego magazynowania ciepła polega na czasowym gromadzeniu nadwyżek energii, które mogą być później wykorzystane w okresach zwiększonego zapotrzebowania, co pozwala na poprawę bilansu energetycznego, redukcję strat ciepła oraz zwiększenie efektywności systemów energetycznych. Podziemne magazyny ciepła w systemach zamkniętych znajdują zastosowanie w szerokim spektrum projektów, od lokalnych instalacji indywidualnych po wielkoskalowe magazyny współpracujące z miejskimi systemami ciepłowniczymi. Ze względu na technologię wykonania i użytkowania systemów typu **UTES** można wyróżnić następujące rodzaje magazynów ciepła (Lee, 2013; Miecznik, 2016, Matos i in., 2019; Menéndez i in., 2019; Żeruń i in., 2022; Majer i Sokołowska (red.), 2022):

- otworowe magazyny ciepła (**BTES**, ang. Borehole Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w warstwie wodonośnej (**ATES**, ang. Aquifer Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w kawernach (**CTES**, ang. Cavity Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w wyrobiskach górniczych (**MTES**, ang. Mine Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych (**TTES**, ang. Tank Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych (**PTES**, ang. Pit Thermal Energy Storage),

---

<sup>1</sup> podział produkcji i konsumpcji energii wedle jej nośników lub sposobów wytwarzania (Bukowski i Śniegocki, 2011)

- fundamenty energetyczne/ geotechniczne konstrukcje termoaktywne (**EF**, ang. Energy Foundation; **TG**, ang. Thermal Geostructures; np.: termopale, termopłyty, termościany, termoobudowy).

Każda z technologii magazynowania charakteryzuje się specyficznymi cechami konstrukcyjnymi, zasadami działania oraz obszarami zastosowań. Zasadniczo podziemne magazyny ciepła w systemach zamkniętych wykorzystują potencjał górotworu na dwa sposoby. Systemy BTES (ang. Borehole Thermal Energy Storage) i EF(TG) (ang. Energy Foundations/Thermoactive Geostructures) wykorzystują do magazynowania naturalne właściwości termiczne górotworu, takie jak przewodność cieplna i pojemność cieplna. Systemy BTES opierają się na wykorzystaniu zespołów otworowych wymienników ciepła, wprowadzających i odbierających ciepło z górotworu. Głębokość i liczba otworów zależy od planowanej pojemności magazynu oraz właściwości termicznych gruntu. Fundamenty energetyczne (geotechniczne konstrukcje termoaktywne) EF(TG) są natomiast szczególnym przypadkiem, w którym elementy konstrukcyjne obiektów budowlanych, takie jak fundamenty, ściany szczelinowe, pale fundamentowe, obudowy tuneli są jednocześnie wykorzystywane jako element konstrukcyjny i element magazynu ciepła. W przypadku systemów typu PTES (ang. Pit Thermal Energy Storage) i TTES (ang. Tank Thermal Energy Storage) górotwór stanowi przestrzeń podziemną, w której magazyn jest lokowany w formie zbiornika. Ponadto górotwór jest wykorzystywany jako dodatkowy izolator i wzmocnienie konstrukcji magazynu. Systemy PTES i TTES, bazują na specjalnie zaprojektowanych zbiornikach podziemnych lub przypowierzchniowych, w których medium akumulującym jest woda, bądź mieszanina wodno-żwirowa. Magazyny tego typu są dodatkowo izolowane w celu minimalizacji strat ciepła.

Publikacja jest skierowana do szerokiego grona odbiorców: inżynierów energetyków, projektantów systemów ciepłowniczych, geologów, geotechników, a także przedstawicieli administracji państwowej i inwestorów zainteresowanych rozwojem innowacyjnych technologii w sektorze ciepłowniczym. Szczególną uwagę poświęcono komponentowi geologicznemu, podkreślając jego kluczowe znaczenie w procesie projektowania i implementacji podziemnych magazynów ciepła.

Opracowanie prezentuje syntetyczną analizę możliwości lokalizowania podziemnych magazynów ciepła w systemach zamkniętych z wykorzystaniem magazynów typu BTES, PTES, TTES i EF(TG). Systemy ATES nie są przedmiotem opracowania. Struktura opracowania została przygotowana w sposób umożliwiający kompleksowe ujęcie tematu, od przeglądu literatury, poprzez charakterystykę technologii, po omówienie kryteriów lokalizacji magazynów ciepła (ze szczególnym naciskiem na kryteria geologiczne) oraz aspektów prawnych.

Czynniki geologiczne odgrywają zasadniczą rolę w rozważaniach nad podziemnym magazynowaniem ciepła. Górotwór jako anizotropowy ośrodek wielofazowy, posiadający określone właściwości, wpływa bezpośrednio na efektywność działania, funkcjonowanie w czasie i trwałość magazynów ciepła. W opracowaniu szczególny nacisk położono na kryteria geologiczne i hydrogeologiczne, które zostały dokładnie omówione i przeanalizowane w kontekście ich znaczenia dla budowy magazynów ciepła. Kompleksowe podejście do zagadnienia obejmuje nie tylko ocenę przydatności poszczególnych obszarów pod kątem parametrów geologicznych, ale także uwzględnienie aspektów technicznych, środowiskowych i ekonomicznych.

Celem publikacji jest dostarczenie kompleksowej wiedzy na temat możliwości lokalizowania i wyboru optymalnej technologii podziemnego magazynowania ciepła w systemach BTES, PTES/TTES oraz EF(TG). W opracowaniu skoncentrowano się na:

- przedstawieniu najnowszych osiągnięć i trendów w dziedzinie podziemnego magazynowania ciepła,

- zaprezentowaniu przykładów implementacji systemów BTES, PTES/TTES i EF(TG) w Polsce i na świecie, co pozwala na porównanie specyfiki projektów w różnych warunkach geograficznych,
- omówieniu kryteriów oraz metodyki oceny lokalizacji pod kątem możliwości wykonania podziemnych magazynów ciepła, ze szczególnym uwzględnieniem komponentu geologicznego,
- analizie aspektów prawnych i administracyjnych, które mają kluczowe znaczenie dla realizacji inwestycji.

W rozdziale 2 opracowania dokonano szczegółowego przeglądu literatury, uwzględniając najnowsze osiągnięcia i trendy w dziedzinie magazynowania ciepła i chłodu na świecie. W rozdziale 3 przedstawiono charakterystykę i podział technologii analizując ich zalety, wady oraz potencjalne obszary zastosowań. W rozdziale 4 skupiono się na praktycznych aspektach wykorzystania magazynów ciepła, prezentując przegląd wybranych realizacji krajowych i zagranicznych. Opisano doświadczenia związane z implementacją systemów w takich krajach jak Szwecja, Czechy, Niemcy oraz Dania. Analiza przypadków została uzupełniona o omówienie krajowych realizacji, co pozwala na porównanie specyfiki projektów realizowanych w różnych warunkach geograficznych i klimatycznych. Tego rodzaju analizy stanowią istotne źródło wiedzy dla projektantów i inwestorów, dostarczając praktycznych wniosków i inspiracji do rozwoju nowych instalacji.

W rozdziale 5 opracowania przedstawiono także aspekty prawne związane z podziemnym magazynowaniem ciepła. Rozdział omawia zarówno krajowe, jak i europejskie regulacje prawne dotyczące planowania, budowy i eksploatacji tego typu instalacji. Szczególną uwagę poświęcono lukom w obowiązujących przepisach oraz konieczności ich uzupełnienia w celu stworzenia spójnego systemu regulacji wspierającego rozwój technologii magazynowania ciepła.

W dalszej części pracy zaprezentowano kryteria oceny lokalizacji podziemnych magazynów ciepła, obejmujące aspekty administracyjno-prawne, geologiczne, techniczne, ekonomiczne, środowiskowe, społeczne oraz polityczne (rozdział 6). Wskazano na konieczność kompleksowej analizy tych kryteriów w procesie wyboru lokalizacji, uwzględniając specyfikę lokalnych uwarunkowań. Znaczenie kryteriów geologicznych podkreślono i szczegółowo omówiono w rozdziale 7.

Metodykę oceny przydatności lokalizacji do budowy magazynów ciepła jako proces analityczny szczegółowo opisano w rozdziale 8. Zaprezentowano ścieżkę prowadzącą do końcowej oceny danej lokalizacji oraz sporządzenia rankingu wszystkich lokalizacji. Omówiono zarówno przegląd i analizę dostępnych danych archiwalnych, jak i przeprowadzanie badań terenowych. Podkreślono znaczenie opracowania rankingów lokalizacji oraz prowadzenia baz danych, które mogą wspierać proces podejmowania decyzji przez inwestorów i projektantów. Publikacja zawiera również szczegółowe wytyczne dotyczące prowadzenia wizji terenowych oraz badań wstępnych i szczegółowych, co pozwala na precyzyjne rozpoznanie warunków lokalizacyjnych dla planowanych inwestycji.

Rozdział 9 został poświęcony terminologii. Zawiera definicje stosowane w opracowaniu przygotowane przez autorów lub podane na podstawie pozycji literaturowych.

## **2. Przegląd literatury w zakresie magazynów ciepła (stan na 31.03.2024)**

Większość zapotrzebowania na ciepło jest obecnie zaspokajana przez źródła oparte na paliwach kopalnych, a zapotrzebowanie na chłodzenie ma gwałtownie wzrosnąć, dlatego coraz ważniejsze staje się wprowadzenie rozwiązań umożliwiających ogrzewanie i chłodzenie bez znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię. Produkcja energii przez odnawialne źródła energii (słonecznej czy

wiatrowej) uzależniona jest od dobowych oraz sezonowych zmian, podobnie jak zapotrzebowanie na energię w budynkach – co skutkuje różnicami pomiędzy czasem najwyższej produkcji a konsumpcji energii. Według najnowszego raportu International Energy Agency (IEA, 2022) budynki mieszkalne oraz komercyjne, publiczne czy przemysłowe odpowiadają za konsumpcję 30% energii globalnie, licząc łącznie energię elektryczną i ciepłą.

Magazynowanie ciepła stanowi jedno z rozwiązań problemu zagospodarowania nadwyżek energii, wdrażania technologii umożliwiających ogrzewanie i chłodzenie bez znacznego wzrostu zapotrzebowania na energię, a także wyrównywania różnic pomiędzy okresem najwyższej produkcji energii z odnawialnych źródeł (np. słonecznych czy wiatrowych), a okresem największego jej zużycia przez odbiorców.

Magazynowanie ciepła i chłodu jest procesem wykorzystywanym od wieków. Inżynierskie konstrukcje nadziemne jak i podziemne budowane były już w czasach starożytnych, szczególnie w przypadku magazynowania lodu (np. perskie lodownie *Yakhchal* oraz inne konstrukcje w Chinach, Grecji czy Macedonii) (Hosseini i Namazian, 2012; Paksoy, 2007). W Polsce ciekawym przykładem jest Zamek w Malborku, który posiadał komorę akumulacyjną wypełnioną kamieniami polnymi. Magazynowały one ciepło z pieców – ogrzane powietrze było następnie rozprowadzane kanałami cieplnymi po pomieszczeniach.

Pierwsze współczesne **podziemne magazyny ciepła (UTES – ang. Underground Thermal Energy Storage)** rozwijały się w latach 70 XX wieku, nie tylko zwiększając wydajność systemów energetycznych, ale przyczyniając się do spadku emisji CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> (Lee, 2013). Wiele publikacji podejmuje próbę zdefiniowania i podziału systemów podziemnego magazynowania energii cieplnej, które opierają się na metodach wykorzystujących właściwą pojemność cieplną (czyli podniesienie temperatury medium o określonym cieple właściwym, bez przemiany fazowej) (ang. SHS – Sensible Heat Storage). Najczęściej technologia ta jest porównywana z technologiami magazynowania ciepła metodami wykorzystującymi entalpię przemiany fazowej (**LHS – ang. Latent Heat Storage/PCM – ang. Phase Changing Materials**) oraz z magazynowaniem termochemicznym (**TCS – ang. Thermochemical Storage**). Sarbu i Sebarchievici (2018) podkreślają, że istotną zaletą **magazynów SHS** (w tym systemów **UTES**) jest niski koszt, prostota technologii oraz brak ryzyka związanego z użyciem toksycznych/niebezpiecznych środków/materiałów. Podziemne magazyny są także szczególnie korzystnym rozwiązaniem dla dużych, energochłonnych instalacji, głównie z uwagi na ich skalowalność, stabilność temperaturową oraz stosunkowo niskie koszty eksploatacyjne. Systemy te są jednak ograniczone przez właściwości termiczne medium akumulującego (grunt/skała/woda) i muszą być odpowiednio zaprojektowane. Istotność oceny parametrów ośrodka podkreślił Akhmetov i in. (2016). W systemach opartych na magazynowaniu w warstwach wodonośnych wydajność systemu limitowana jest przez chemizm wód, przepuszczalność warstwy wodonośnej, jej miąższość oraz przepływ wód, natomiast w systemach umieszczonych w górotworze na wydajność wpływają między innymi takie parametry geologiczne jak wilgotność naturalna, gęstość objętościowa i przewodność cieplna ośrodka. Szeroka możliwość zastosowania systemów **UTES** przedstawiona jest w pracy Manonelles (2014). Przykładowe aplikacje systemów to ogrzewanie i chłodzenie wszelkich budynków industrialnych i komercyjnych, chłodzenie obiektów przemysłowych, centrów IT i innych pomieszczeń produkujących duże ilości ciepła odpadowego, a także chłodzenie i ogrzewanie upraw i produktów rolnych w szklarniach. W publikacji Gao i in. (2008) przedstawiono rozwój technologii pomp ciepła w systemach **UTES** opisując wybrane systemy ze Szwecji, Turcji, Stanów Zjednoczonych, Japonii, Kanady oraz bardziej szczegółowo – Chin. Autor zaznaczył potencjał instalacji **UTES** w przyszłości jako najczęściej wykorzystywanej technologii magazynowania w Ameryce Północnej i Europie.

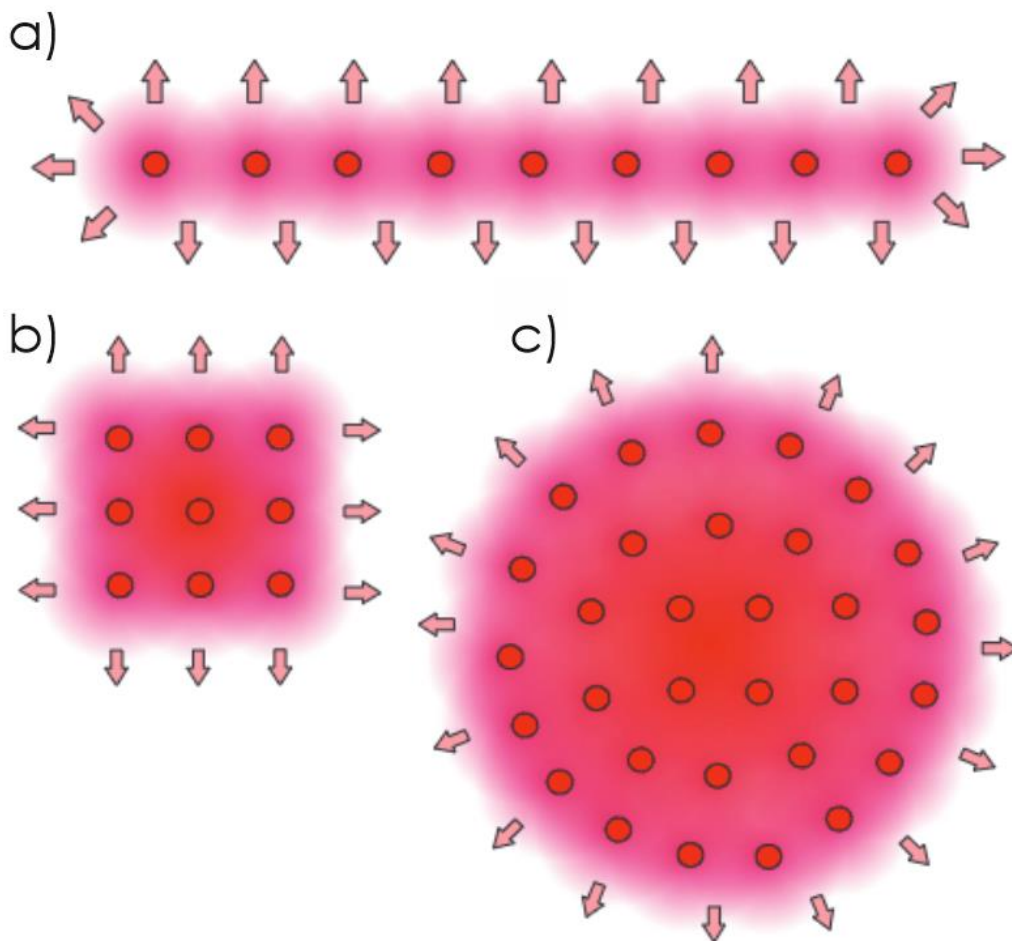
Istnieje wiele raportów opisujących aktualny stan różnych systemów podziemnego magazynowania energii cieplnej, wykorzystanej technologii, metod projektowych, wydajności instalacji oraz ich kosztów. Projekt HEATSTORE opisany przez Kallesøe i in. (2019) zakładał obniżenie kosztów, zredukowanie ryzyka oraz podniesienie wydajności pracy systemów **UTES** w wysokich temperaturach (do 90°C). Podział magazynów, wytyczne projektowe oraz opis najbardziej korzystnych warunków geologicznych dla każdego systemu zawierają się w obszernym niemieckim raporcie, skupiającym się na magazynowaniu podziemnym (Mangold i Deschaintre, 2015). W pracy Socaciu (2012) podkreślono, że dla wszystkich magazynów ciepła należy przeprowadzić badania geologiczne w fazie przedprojektowej. Decyzja o zastosowaniu określonej technologii zależy głównie od warunków lokalnych, a przede wszystkim od sytuacji geologicznej i hydrogeologicznej w danej lokalizacji. Raport IEA ECES (2018) szczegółowo przedstawił różne istniejące systemy **UTES** i czynniki wpływające na ich funkcjonowanie. Projekt przedstawia działanie i parametry instalacji używanych w integracji z siecią ciepłowniczą. Wytyczne Solites (2016) oprócz charakterystyki i podziału magazynów ciepła, przedstawiają zasady integracji systemów **UTES** z istniejącą zabudową. Ciekawą klasyfikację systemów **TES** (**ang. Thermal Energy Storage**) prezentuje raport przygotowany przez Delta Energy & Environment Ltd. (2016). Dzieli on **magazyny ciepła jawnego** (**SHS – ang. Sensible Heat Storage**) ze względu na możliwości aplikacji (sieć grzewcza, budynki mieszkalne, budynki niemieszkalne) oraz stopień rozwoju technologii na rynku.

Większość publikacji wyróżnia 5 rodzajów technologii magazynowania energii cieplnej:

- **BTES (Borehole Thermal Energy Storage) – otworowy magazyn ciepła,**
- **ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) – magazyn ciepła w warstwie wodonosnej,**
- **TTES (Tank Thermal Energy Storage) – magazyn ciepła w specjalnie wykonanym zbiorniku podziemnym,**
- **PTES (Pit Thermal Energy Storage) - magazyn ciepła w specjalnie wykonanym zbiorniku przypowierzchniowym,**
- **CTES (Cavern Thermal Energy Storage) – magazyn ciepła w kawernach,**
- **MTES (Mine Thermal Energy Storage) - magazyny ciepła w wyrobiskach górniczych.**

Najczęściej opisywaną w literaturze krajowej i zagranicznej technologią podziemnego magazynowania ciepła są systemy **BTES** wykorzystujące otworowe wymienniki ciepła. Technologia ta jest wykorzystywana od ponad 40 lat, mimo to nie istnieje ujednoczona definicja systemu **BTES** (Gehlin, 2016). Raport IEA ECES (1997) definiuje **BTES** jako system gdzie skała bądź grunt jest medium magazynującym energię, do którego dostęp nadają wymienniki ciepła w systemie zamkniętym umieszczone w otworach wiertniczych. W pracy Nordell (2000) zaproponowano podział instalacji ze względu na ich skalę (tzn. liczbę otworowych wymienników), połączenie systemu z pompami ciepła i sezonowość. Największą zaletą **BTES** jest potencjalna bardzo duża zasobność (jest to magazyn bezzbiornikowy, tak więc nieograniczony wielkością konstrukcji), wyzwaniem mogą być za to wysokie koszty odwiertów, niższa efektywność w porównaniu do innych typów **UTES** oraz ograniczona pojemność cieplna (Delta Energy & Environment Ltd., 2016). Dlatego też podkreślany jest wpływ czynników geologicznych na ocenę pracy systemu. Aby uzyskać odpowiedni transport ciepła do gruntu/skały, potrzebna jest wysoka przewodność cieplna górotworu, natomiast w świetle możliwych strat ciepła wysoka przewodność może być ryzykowna. Podobnie obecność wód w ośrodku porowatym z jednej strony podnosi korzystnie pojemność cieplną medium, jednak wysoki przepływ wód podziemnych potrafi znacząco zmniejszyć wydajność magazynu (Reuss, 2015). Ocena wydajności **BTES** jest więc zagadnieniem skomplikowanym, w którym należy uwzględnić wiele czynników. Znaczna część literatury poświęcona jest zagadnieniom odpowiedniego modelowania symulowanej pracy otworowych wymienników ciepła, co pozwala na rozwój technologii

odpowiedzialnego projektowania. Przedstawiane są nowe narzędzia modelowania numerycznego, pozwalające na uwzględnienie różnego rodzaju czynników, takich jak: wymiary otworu, parametry instalacji oraz izolacji, parametry górotworu, czas działania, różne modele ładowania i ekstrakcji energii cieplnej (Schulte i in., 2016; Brown i in., 2023; Mielke i in., 2014; Welsch i in., 2015; Welsch i in., 2016). W modelowaniu numerycznym otworowych podziemnych magazynów ciepła znaczenie mają również wiarygodne wartości przewodności termicznej górotworu (Holmberg, 2009) oraz obliczenia zmian temperaturowych zachodzących podczas eksploatacji magazynu (Korhonen i in., 2018; Penttilä i in., 2014). Ważnym czynnikiem jest plan rozmieszczenia gruntowych wymienników ciepła oraz ich odległość od siebie. Optymalną geometrią dla wydajnego systemu jest ułożenie otworów na planie koła bądź sześciokąta, gdzie głębokość wymienników jest zbliżona do średnicy instalacji (Skarphagen, 2019) (Rysunek 1).



**Rysunek 1** Rozmieszczenie gruntowych wymienników ciepła (Skarphagen, 2019)

a) Liniowa konfiguracja gęsto rozmieszczonych otworowych wymienników ciepła cechuje się ograniczoną efektywnością w zakresie magazynowania ciepła, co wynika z dużego obwodu układu, przez który możliwe są znaczne straty ciepła, b) Bardziej zwarta geometria układu, np. siatka kwadratowa BHE, wykazuje wyższą efektywność w akumulacji ciepła, c) jeszcze korzystniejsze parametry osiągają układy o kształcie heksagonalnym lub cylindrycznym, co jest związane ze zmniejszającym się stosunkiem powierzchni do objętości wraz ze wzrostem skali układu

Istniejące systemy **BTES** opisane są licznie w literaturze zagranicznej, głównie w krajach z dużą liczbą długoletnio działających instalacji jak Szwecja czy Norwegia. W Norwegii znajdują się jedne z największych otworowych magazynów, działające od kilkunastu lat, z wymiennikami umieszczonymi na znacznych głębokościach (150-200 m) (Midttømme i Hauge, 2009). Dobrze monitorowanym, dużym obiektem jest wysokotemperaturowy **BTES** w mieście Emmaboda w Szwecji, który pracuje od

2010 roku. Doprowadzenie medium do docelowej temperatury, niezbędnej dla efektywnej długoletniej pracy magazynu, może zająć kilka lat, dlatego system ten jest stale monitorowany i porównywany z zakładanymi efektami (Nordell i in., 2016). Największe systemy **BTES** w Szwecji mają średnio ponad 130 wymienników o głębokości powyżej 200 m (Hellström, 2012). Znaczna ilość instalacji znajduje się także w Belgii, jednak głębokość wymienników jest znacznie mniejsza i mieści się w przedziale 30-125 m (Desmedt i in., 2006). Monzó i in. (2016) oraz Monzó i in. (2017) opisali system **BTES** na Uniwersytecie Sztokholmskim, składający się z 130 otworów wiertniczych o głębokości 230 metrów, oraz wczesne wyniki pomiarów z pierwszych miesięcy eksploatacji. Badania przedstawione w publikacji Baser i in. (2019) pomogły w zrozumieniu charakterystyki magazynowania ciepła w systemach **BTES** zainstalowanych w strefie aeracji, w oparciu o istniejący magazyn w San Diego (USA). W pracy Kizilkian i Dincer (2013) zbadano charakterystykę oporu termicznego wymienników ciepła na podstawie instalacji działającej na terenie Politechniki Ontario (Kanada).

Istotnym wyzwaniem pozostaje integracja dużych systemów **BTES** z sieciami ciepłowniczymi. W literaturze wiele uwagi poświęca się zagadnieniom optymalizacji ich działania, zwłaszcza w kontekście wykorzystania ciepła odpadowego (Bossennec i in., 2023; Welsch i in., 2018; Guo i in., 2022; Fiorentini i in., 2022).

Pomimo podkreślania znaczącego wpływu parametrów geologicznych na wydajność podziemnych magazynów ciepła, zdecydowanie mniej uwagi poświęca się badaniom terenowym i laboratoryjnym ośrodka, w którym instaluje się wymienniki. W literaturze można jednak znaleźć liczne przykłady prac skupiających się na szczegółowym rozpoznaniu warunków geologicznych oraz charakterystyce właściwości termicznych gruntów i skał.

Giordano i in. (2015) przedstawili badania budowy geologicznej i parametrów materiału skalnego, w tym pomiary właściwości termicznych gruntów wykonane w laboratorium w Turynie, które posłużyły do usprawnienia modelu obliczeniowego i zwiększenia wiarygodności symulacji. Kompleksowe rozpoznanie podłoża miało znaczenie również przy projekcie w miejscowości Emmaboda (Szwecja), gdzie wiercenia w granodiorytach pozwoliły zlokalizować dużą strefę spękań z wysokim przepływem wód szczelinowych (Nillson i Rohdin, 2019). W pracy Sibbitt i McClenahan (2015) zwrócono uwagę na wymagane warunki geotechniczne, aby możliwe było zamontowanie wydajnego systemu otworowych wymienników ciepła. Bicknell (2023) przedstawił badania podstawowych właściwości termicznych różnych typów gruntu, co pozwoliło na dokładne sparametryzowanie modelu numerycznego. W publikacji Sani i Singh (2020) zbadano reakcję nienasyconych gruntów o różnej frakcji na nagrzewanie. Wang i Qi (2011) poruszyli zagadnienie wpływu temperatury, dostarczania ciepła i początkowej zawartości wilgoci na wydajność termiczną wymienników ciepła. W artykule Zhu i in. (2021) opracowano formułę do przewidywania zmian temperatury w drobnoziarnistym piasku podczas procesów magazynowania i uwalniania ciepła. W publikacji Xu i in. (2022) podkreślono znaczenie wpływu migracji ciepła i wilgoci na magazynowanie energii cieplnej, mierząc przewodność cieplną gliny w różnych temperaturach.

Technologia magazynów typu **TTES** (naziemne bądź podziemne zbiorniki wypełnione wodą) jest dobrze rozwinięta na całym świecie i szeroko opisana w literaturze. Jednym z niewielu ograniczeń hydrogeologicznych jest występowanie wody podziemnej w podłożu instalacji **TTES**, mogącej wpływać na straty ciepła (Mangold i Deschaintre, 2015). Na wydajność magazynów wpływają też czynniki pogodowe, konstrukcyjne oraz różne modele użytkowania. Duża część literatury poświęconej **TTES** skupia się na matematycznym modelowaniu efektywności magazynowania w zmiennych warunkach i przy użyciu różnych materiałów i konfiguracji projektowych. W publikacji Alptekin i Ezan (2019) praca **TTES** została zamodelowana z użyciem rzeczywistych danych takich jak promieniowanie słoneczne, prędkość wiatru czy temperatura otoczenia. Jednocześnie został

sprawdzony wpływ parametrów konstrukcyjnych takich jak wysokość zbiornika i zmiana natężenia przepływu. Zhu i in. (2022) przeanalizowali wpływ czasu pracy, natężenia przepływu i stosunku wysokości do średnicy magazynu na grubość termokliny w zbiorniku. W Kaloyanov i in. (2023) zbadano wpływ poziomego ładowania zbiornika na rozkład temperatury i jej stratyfikację. Często poruszonym zagadnieniem jest kombinacja systemu magazynowania ciepła jawnego jakim jest **TTES** z metodami magazynowania ciepła utajonego i procesami przemiany fazowej materiałów (Frazzica i in., 2023). Magazyny zbiornikowe mogą współpracować z magazynami otworowymi, proponowana parametryzacja tych dwóch systemów przedstawiona jest w Kim i Kim (2018).

Magazyny typu **PTES** są zbiornikami przypowierzchniowymi, wypełnionymi wodą lub mieszaniną wody i gruntu. Bardzo ważnym czynnikiem przy doborze lokalizacji pod **PTES** jest brak występowania warstwy wodonosnej (wpływ przepływu wód podziemnych na zbiornik **PTES** zbadał Dahash i in. (2021). Najbardziej kosztowną częścią magazynu jest izolacja, co stawia przed projektantami nowe zagadnienia modelowe (Schmidt i in., 2018; Ochs i in., 2020). Istniejące magazyny typu **PTES** i ich zróżnicowanie pod względem objętości, materiałów wypełnienia i izolacji przedstawiła Xiang i in. (2022). W pracy Andersen i in. (2013) wskazano wyzwania związane z projektowaniem i realizacją systemów **PTES**, w oparciu o istniejącą instalację w Danii i historię jej konstrukcji. Na przestrzeni ostatnich lat powstało wiele publikacji zajmujących się tematyką obliczania wydajności **PTES** przy użyciu modelowania numerycznego (Pan i in., 2022; Gauthier, 2020; Xie i in., 2021; Xie i in., 2022; Narula i in., 2020; Dahash i in. 2020). W artykule Sifnaios i in. (2023) opracowano trójwymiarowy model obszaru gruntu wokół **PTES**, ukazując wpływ wód podziemnych na temperaturę gruntu po 25 latach eksploatacji. W pracy Pan i in. (2022) przeprowadzono badania eksperymentalne i teoretyczne, analizując długoterminową wydajność cieplną 60,000 m<sup>3</sup> wodnego magazynu ciepła w Dronninglund w Danii, a ich wyniki posłużyły do walidacji zmodyfikowanego modelu numerycznego. Publikacja Ochs i in. (2020) porównuje pracę **TTES** oraz **PTES**, z zaznaczeniem ważności rozpoznania parametrów termicznych gruntu, w którym zbiorniki zakopane są częściowo bądź całkowicie.

W literaturze krajowej magazynowanie energii cieplnej zostało poruszone jako istotne zagadnienie już przez Domańskiego (1983). Podkreślił on, że problematyka magazynowania obejmuje wiele dziedzin, takich jak transport ciepła, zagadnienia chemiczne, problemy konstrukcyjne, kwestie analizy ekonomicznej oraz bezpieczeństwa. Obecnie spełnienie wymogów klimatyczno-energetycznych w Polsce wymagać będzie zwiększenia ilości i wydajności technologii OZE w skali krajowej. Efekt ten nie zostanie zapewniony wyłącznie przez rozwijającą się energetykę słoneczną oraz wiatrową (Maca, 2017). Energia geotermalna, zwłaszcza niskotemperaturowa, może odegrać kluczową rolę w transformacji energetycznej kraju.

W strukturze zasobów niskotemperaturowej energii odnawialnej grunt stanowi szczególnie obiecujące dolne źródło ciepła (Rubik, 2011). W pracy Mania i Kawa (2015) określono zastosowanie „Magazynów Energii Ciepłej *MEC*” najprostszym rozwiązaniem na zwiększenie wydajności systemów grzewczych i chłodniczych, ograniczających przy tym emisję CO<sub>2</sub>. W monografii „Inżynieria Instalacji Magazynowania Energii Ciepła” (Mania i Kawa, 2016) został zaproponowany podział systemów magazynowania energii cieplnej w gruncie – podobnie jak w literaturze zagranicznej, wyróżniono systemy **BTES**, **ATES**, **PTES**, **TTES** oraz **CTES**. Jako odmiana konstrukcyjna **BTES** opisane jest także użycie pali energetycznych. Miecznik (2016) podkreśla możliwość wyrównania krzywej zapotrzebowania na moc cieplną oraz chłodniczą w warunkach klimatycznych Polski za pomocą technologii sezonowych magazynów ciepła **STES**. Wyróżnia on trzy rodzaje instalacji, **BTES**, **ATES** oraz **CTES**, przywołując wiele przykładów zagranicznych magazynów, zwracając uwagę na ograniczone zastosowanie w Polsce – głównie w skali laboratoryjnej

i instalacji o mocy cieplnej poniżej 1 MW. Minkiewicz (2023) wskazał, że polskie doświadczenia skupiają się głównie na naziemnych magazynach ciepła.

Wykorzystanie systemów **UTES** powinno charakteryzować się przede wszystkim bezpieczeństwem środowiska oraz opłacalnością ekonomiczną. Z racji rosnącej konsumpcji energii, jak i nadwyżek energii odpadowej zagadnienie magazynowania często rozpatrywane jest w kontekście największych emitentów energii, takich jak budynki biurowe, usługowe czy przede wszystkim – przemysłowe (Gonet i in., 2012). Według raportu Fundacji WWF Polska (Chmielewski i in., 2020) magazynowanie ciepła najczęściej stosowane jest w pobliżu konwencjonalnych elektrociepłowni, natomiast przy magazynach chłodu główni odbiorcy to obiekty hotelowe, budynki publiczne, centra handlowe czy magazyny towarów wymagających przechowywania w niskich temperaturach.

W krajowej literaturze zagadnienie **UTES** jest najczęściej opisywane na podstawie instalacji **BTES** oraz **ATES**. Znaczący udział w opisach i propozycjach instalacji magazynów ciepła mają także parametry geologiczne i hydrogeologiczne oraz ekonomiczne. W pracy Śliwa i Kotyza (2003) zaproponowano możliwość przekształcenia wyeksploatowanych i nieczynnych odwiertów na terenie Polski w otworowe wymienniki ciepła. Pozwoliłoby to na uniknięcie wysokich kosztów wiercenia nowych otworów. Poniesione koszty rekonstrukcji mogłyby zostać zrównoważone przez dobrą wydajność cieplną instalacji, która zależy między innymi od parametrów geologicznych górotworu. W publikacji Wiśniewska i in. (2014) podkreślono, że rozpoznanie przewodności oraz pojemności cieplnej górotworu, a także lokalnych warunków gruntowo-wodnych jest niezbędne przy projektowaniu sond gruntowych. Wpływ zmian litologicznych zobrazowano w pracy Kowalski i in. (2017) porównując produktywność zaprojektowanych wymienników ciepła w Polsce i w Macedonii, gdzie obliczono wydajność i opłacalność możliwych instalacji.

W Polsce opracowywane są teoretyczne modele otworowych wymienników ciepła, pozwalające na ocenę zmiennego przepływu ciepła w czasie przez wymienniki pionowe (Gonet i in., 2005, za Wołoszyn 2012). Jednymi z głównych poruszanych czynników są: wpływ rozmieszczenia wymienników otworowych na ilość wprowadzonej i odebranej energii (Wołoszyn, 2014), wpływ parametrów górotworu na dystrybucję temperatury w magazynie (Śliwa i in., 2012a), czy konstrukcja samych wymienników (Śliwa i in., 2022). Z uwagi na możliwe powiązanie pracy otworowych wymienników ciepła w systemach **BTES** z pracą pomp ciepła, wiele wytycznych obliczeniowych i modelowych znaleźć można w literaturze kierowanej do projektantów pomp ciepła (Zawadzki, 2003; Rubik, 2006; Oszczak, 2011; Rubik 2011; Kopeć, 2015).

Udział Polski na tle Europy w zakresie podziemnego magazynowania energii jest niewielki, jednak rozwój kolejnych inwestycji i wzrost ich wydajności pokazuje, że są to instalacje, które mogłyby zwiększyć swój udział na rynku krajowym. Jedną z najlepiej monitorowanych instalacji jest magazyn ciepła i chłodu działający w ramach aktywności Laboratorium Geoenergetyki Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (WWNiG AGH). Pierwsze wymienniki magazynu wiercone były w 2007 roku, a liczba otworów jest wciąż powiększana. Instalacja służy do aktywnego ogrzewania oraz chłodzenia Auditorium WWNiG AGH (Śliwa i in., 2011a). Magazyn wyróżnia zróżnicowana budowa wymienników, co pozwala określić różnice w wydajności w zależności od typu konstrukcji. W laboratorium prowadzone są też symulacje działalności magazynu, pomiary instalacji oraz Testy Reakcji Termicznej - TRT (Śliwa i in., 2018; Sapińska-Śliwa i in., 2019; Śliwa i in. 2022).

W publikacji Złotkowski i in. (2011) podkreślono niezbędność testów TRT przy projektowaniu instalacji **BTES**. Uzyskane rzeczywiste wartości przewodności termicznej gruntów w profilu lokalizacji magazynu pozwalają na dobór optymalnej liczby i głębokości otworów. Ważność testu TRT przy dużych projektach podkreślił także w Śliwa i in. (2011b) w opisie instalacji grzewczo-

chłodniczej bazującej na otworowych wymiennikach ciepła zasilającą sklep firmy IKEA w Łodzi. Na szczególną uwagę zasługują również instalacje **UTES** zasilające kilka obiektów na raz – jak magazyn ciepła w Pałecznicy dostarczający ciepło i chłód trzem budynkom wielofunkcyjnym (Śliwa i in., 2014) czy połączenie technologii **BTES** i **PTES** w Lidzbarku Warmińskim w celu bezpośredniego zasilania ciepłowni (Euros Energy, 2022). Część analiz konkretnych obiektów w Polsce skupia się na ocenie możliwości rozwoju geotermii w przyszłości na przykładach analizy zapotrzebowania sieci ciepłowniczej miast (Hałaj i in., 2021), czy regeneracji ośrodka gruntowego wokół istniejących wymienników (Piotrowska-Woroniak, 2021).

Zbiornikowe magazyny ciepła typu **PTES** nie są obecnie popularnym rozwiązaniem w Polsce, pomimo niewielkich wymogów co do warunków geotechnicznych i prostoty konstrukcji. Opłacalne inwestycje rozważane są często w kontekście możliwości wykorzystania istniejącej, nowoczesnej sieci ciepłowniczej (Kubiński i Szablowski, 2019). Praca **PTES** w krajowych publikacjach analizowana jest głównie poprzez symulację modeli pracy możliwych do wykonania zbiorników i wpływu różnych zmiennych na ich wydajność (Słomczyńska i in., 2022; Instytut Energetyki Odnawialnej, 2022). Pilotażowym magazynem **PTES** wykonanym w polskich warunkach został zbiornik w Lidzbarku Warmińskim (Euros Energy, 2024).

W Polsce operują obecnie duże, naziemne magazyny **TTES**, w tym w elektrociepłowniach Siekierki, Kraków, Białystok, Bielsko-Biała czy Ostrołęka, działające w systemie dobowym. Porównanie konstrukcji przedstawiono w pracy Zwierzchowskiego (2017). Dokonano również analizy energii systemu hydraulicznego wewnątrz **TTES** (Zwierzchowski i in., 2020) oraz propozycji rozwiązań technicznych zmniejszających koszty instalacji (Zwierzchowski, 2019). Zbudowanie modelu współpracującego z cyfrowymi systemami sterowania wymaga wieloetapowej analizy szeregu czynników (Badyda i in., 2011). Brak jest krajowych doświadczeń związanych z podziemnymi, sezonowymi **TTES**.

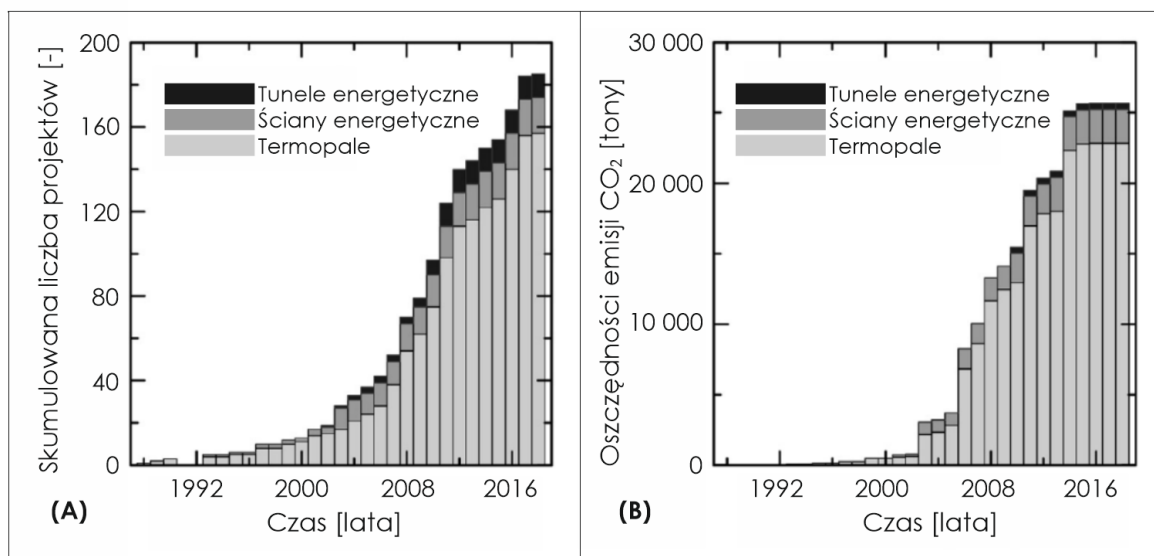
Szczególnie ciekawym rozwiązaniem w kwestii magazynowania energii cieplnej w podłożu są termoaktywne elementy konstrukcji budynku, czyli **fundamenty energetyczne** (w skrócie **EF**, od ang. **Energy Foundations**) lub **geotechniczne konstrukcje termoaktywne** (w skrócie **TG**, od ang. **Thermal Geostructures**). Magazynowanie może odbywać się w trybie dziennym lub sezonowym, przy czym możliwość połączenia tych dwóch rozwiązań przedstawia największe korzyści energetyczne, co zostało udowodnione w pracy Lanahan i Tabbares-Velasco (2017).

Technologia fundamentów energetycznych przedstawia szczególnie atrakcyjne rozwiązania dla terenów zurbanizowanych, gdzie miejsce na otworowe wymienniki ciepła jest mocno ograniczone. Zdecydowana większość budynków wysokościowych i podziemnej infrastruktury miejskiej (jak parkingi podziemne, tunele i stacje metra) ma znacznie rozwiniętą konstrukcję fundamentową, która może być aktywowana termicznie do celów grzewczych i chłodniczych (Brandl, 2006; Ryżyński i Bogusz, 2016; Barla i Di Donna, 2018; Baralis i in., 2018; Laloui i Rotta Loria, 2019; Laloui i Sutman, 2019; Rotta Loria, 2020).

Zagadnienie poprawnego zaprojektowania i wykonania instalacji **EF(TG)** jest szczególnie złożonym problemem inżynierskim wymagającym skoordynowania prac ekspertów z różnych dziedzin, na co w swojej pracy wskazuje H. Brandl (2006).

Pale energetyczne (termopale), jak wskazano na wykresie (Rysunek 2), stanowią zdecydowanie najszerzej stosowaną technologię **EF(TG)**. Pierwsze instalacje powstawały już w latach 80-tych XX wieku w Austrii i Szwajcarii (Brandl, 2006). Znajdują zastosowanie głównie w budownictwie biurowym i mieszkalnym, gdzie zapotrzebowanie na ciepło grzewcze i chłodnicze jest stosunkowo wysokie. Wymiennik z czynnikiem roboczym zamkniętym w rurze polietylenowej jest umieszczany

najczęściej w wielkośrednicowym palu wierconym, bądź w palu wbijanym. Wykorzystanie istniejącego elementu konstrukcji w celach grzania jak i chłodzenia obiektu pozwala na szybki zwrot kosztów inwestycyjnych. Możliwości transportu ciepła przez pal energetyczny są kilkukrotnie większe niż ma to miejsce w przypadku klasycznych otworowych wymienników ciepła o tej samej lub zbliżonej długości, ponieważ pal energetyczny zapewnia znacznie większą powierzchnię kontaktu wymiennika z górotworem (Brandl, 2006; Fadejev i in., 2017; Mohamad i in., 2021; Zhang i in., 2022; Zhong i in., 2022). Ważnym aspektem przy implementacji technologii termopali jest wpływ zmian temperatury na ich przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia, zarówno w palach, jak i w otaczającym gruncie (Anongphouth i in., 2020). Zasoby literatury zagranicznej są bardzo obszerne i umożliwiają kompleksowe rozpoznanie zagadnienia związanego z projektowaniem, wykonywaniem i użytkowaniem tego typu konstrukcji **EF(TG)**.



**Rysunek 2 (A) Łączna liczba geostruktur energetycznych na całym świecie; (B) Oszczędności emisji CO<sub>2</sub> dzięki tym projektom. Stan na 2016 rok (Laloui i Rotta Loria, 2019)**

Krajowa literatura naukowa jest w tej kwestii bardzo ograniczona. W pracy Jastrzębskiej i Wawrzyńczyka (2016) przedstawiono analizę sposobu posadowienia budynku użyteczności publicznej przy wykorzystaniu termopali. Możliwość ich zastosowania w skali miejskiej z wykorzystaniem Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich została zaprezentowana w pracy Ryżyński i Bogusz (2016), gdzie również wskazano na możliwość rozwoju tej technologii w przypadku pozostałych aglomeracji miejskich na terenie kraju. W pracach Bogusza (2017) i Macy (2017) opisano poglądowo technologie **EF(TG)** i poruszono zagadnienie pali energetycznych. W monografii Mania i Kawa (2016) termopale zostały opisane jako szczególny rodzaj systemów **BTES**. Piotrowicz i in. (2018) porusza zagadnienie kontaktu termopal-podłoże w warunkach zmian temperatur spowodowanych pracą wymiennika.

Odrębny rodzaj **EF(TG)** stanowią termoaktywne ściany szczelinowe. Technologia ta jest znana i stosowana z powodzeniem od końca lat 80-tych XX wieku w takich krajach jak Austria, Szwajcaria, Wielka Brytania. Zagadnienia projektowania, wykonywania i funkcjonowania zostały obszernie poruszone w wielu pracach (Sterpi i in., 2016; Rui i Yin, 2020; Sterpi i in., 2018; Makasis i in., 2019; Dong i in., 2020; Makasis i Narsilio, 2022; Peterson i Shafagh, 2022). Istotnym elementem przy ścianach szczelinowych, które w porównaniu z innymi technologiami UTES są dość płytką instalacją, jest wpływ sezonowych wahań temperatury gruntu (Xu i in., 2023). Na chwilę obecną brakuje krajowych doświadczeń związanych z tą technologią.

Tunele energetyczne są prawdopodobnie najmniej zbadaną geo-inżynierską konstrukcją energetyczną. Według Barla i Perino (2014) mogą jednak odegrać zasadniczą rolę w bieżącym wyzwaniu, jakim jest zaspokojenie rosnącego zapotrzebowania na czyste i odnawialne źródła energii. Techniczne wyzwania związane z implementacją tuneli energetycznych opisano w pracy Nicholson i in. (2014). W porównaniu z konwencjonalnymi energetycznymi fundamentami budynków tunele wymagają większej objętości podłoża i powierzchni do wymiany ciepła (Baralis i in., 2018). Alternatywnie wymianę ciepła można również wykorzystać do chłodzenia tuneli, aby poprawić samowystarczalność cieplną i możliwości klimatyzacyjne infrastruktury metra (Barla i Di Donna, 2018). System umożliwia również przechwytywanie ciepła wytwarzanego poprzez przyspieszanie i hamowanie pociągów metra (Barla i Insana, 2023). Jedyna publikacja typu case-study dotycząca tuneli energetycznych w Polsce opisuje możliwość odzysku energii przy pomocy ścian okładzinowych tuneli metra warszawskiego w rejonie stacji Szwedzka i Trocka (Baralis i in., 2018).

### 3. Charakterystyka i podział magazynów ciepła

Magazynowanie energii cieplnej (**TES**, ang. Thermal Energy Storage) odbywa się poprzez ogrzewanie lub chłodzenie nośnika tak, aby zakumulowana energia mogła być wykorzystana w późniejszym czasie do ogrzewania lub chłodzenia oraz do wytwarzania energii elektrycznej. Systemy **TES** znajdują zastosowanie głównie w ciepłownictwie i przy procesach przemysłowych. Korzyści z zastosowania **TES** w systemie energetycznym obejmują wzrost ogólnej sprawności i lepszą niezawodność, a także mogą prowadzić do obniżenia kosztów eksploatacyjnych oraz znacząco zmniejszając zanieczyszczenia środowiska poprzez redukcję emisji CO<sub>2</sub> (Sarbu i Sebarchievici, 2018).

Istnieje wiele technologii magazynowania energii cieplnej, które są badane i rozwijane w ostatnich dekadach. Wybór technologii **TES** dla konkretnego zastosowania zależy od wielu kryteriów, w tym trybu magazynowania (dobowy lub sezonowy), kosztów, wymagań dotyczących temperatury zasilania i użytkowania oraz pojemności magazynowania. Niektóre z nich służą do przechowywania energii cieplnej w małej i średniej skali, a inne do przechowywania energii cieplnej w dużej ilości (Akhmetov i in., 2016).

Ogólny podział magazynów ciepła przedstawia się następująco (Rysunek 3):

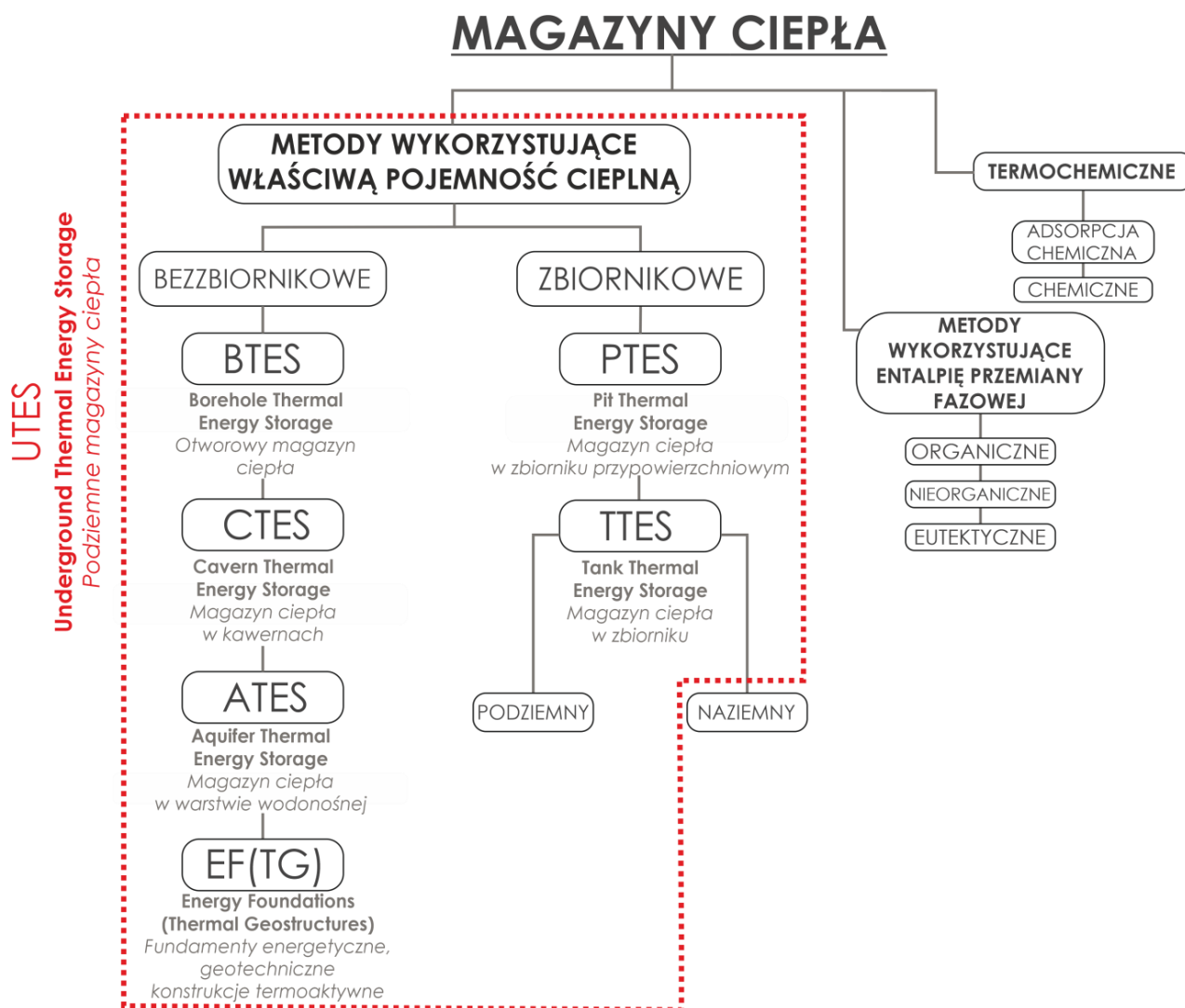
- termochemiczne wykorzystujące odwracalne reakcje chemiczne do magazynowania dużych ilości ciepła w niewielkiej objętości (**THS/TCES**, ang. Thermochemical Heat Storage),
- wykorzystujące ciepło przemian fazowych materiału uwalniane w trakcie przejścia z fazy stałej do ciekłej, bądź z ciekłej do gazowej (**PCM**, ang. Phase Changing Materials–/ **LHTES** - ang. Latent Heat Thermal Energy Storage),
- wykorzystujące ciepło właściwe ośrodka (**SHS/SHTES**, ang. Sensible Heat Storage).

Szczególnym rodzajem magazynów typu **SHS** są podziemne magazyny ciepła (**UTES**, ang. Underground Thermal Energy Storage), stanowiące również rodzaj magazynów długoterminowych. Technologia ta umożliwia magazynowanie ciepła w okresie letnim i jego odzyskiwanie w okresie zimowym w celach grzewczych. W podobny sposób chłód może być magazynowany zimą i odbierany latem w celach chłodniczych. Systemy typu **UTES** są szczególnie opłacalne, gdy potrzebna jest duża objętość i pojemność akumulatora do magazynowania energii cieplnej. W efekcie stały się jedną z najczęściej stosowanych technologii magazynowania ciepła w Ameryce Północnej i Europie (Lee, 2013).

Ze względu na technologię wykonania i użytkowania systemów typu **UTES** należy wyróżnić wymienione kolejno rodzaje magazynów ciepła (Lee, 2013; Miecznik, 2016; Matos i in., 2019; Menéndez i in., 2019; Żeruń i in., 2022; Majer i Sokołowska (red.), 2022):

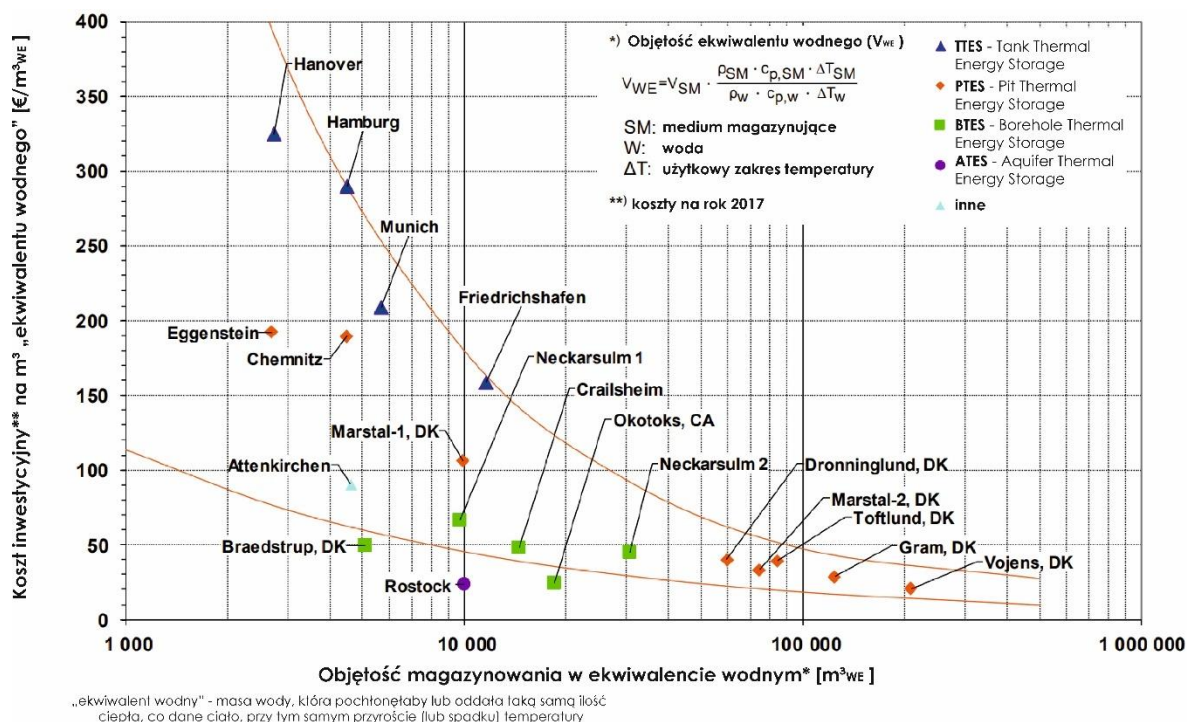
- otworowe magazyny ciepła (**BTES**, ang. Borehole Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w warstwie wodonośnej (magazyn otwarty) (**ATES**, ang. Aquifer Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w kawernach (**CTES**, ang. Cavity Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w wyrobiskach górniczych (**MTES**, ang. Mine Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych (**TTES**, ang. Tank Thermal Energy Storage),
- magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych (**PTES**, ang. Pit Thermal Energy Storage),
- fundamenty energetyczne/ geotechniczne konstrukcje termoaktywne (**EF**, ang. Energy Foundation; **TG**, ang. Thermal Geostrutures; np.: termopale, termopłyty, termościany, termoobudowy).

Podziemne magazyny ciepła UTES można podzielić na zbiornikowe i bezzbiornikowe (Rysunek 3). Przedmiotem oceny możliwości lokalizowania są technologie BTES, TTES, PTES oraz EF(TG).



Rysunek 3 Podział technologii magazynowania ciepła

Instalacje o małej pojemności (ok. 1 000–10 000 m<sup>3</sup>WE) charakteryzują się wysokimi kosztami jednostkowymi, zwłaszcza w przypadku zbiorników naziemnych (TTES). Wraz ze wzrostem objętości magazynów, koszt jednostkowy znacząco maleje, szczególnie dla magazynów przypowierzchniowych PTES (Rysunek 4).



Rysunek 4 Koszty inwestycyjne dla różnych technologii magazynowania ciepła (Schmidt et al., 2018)

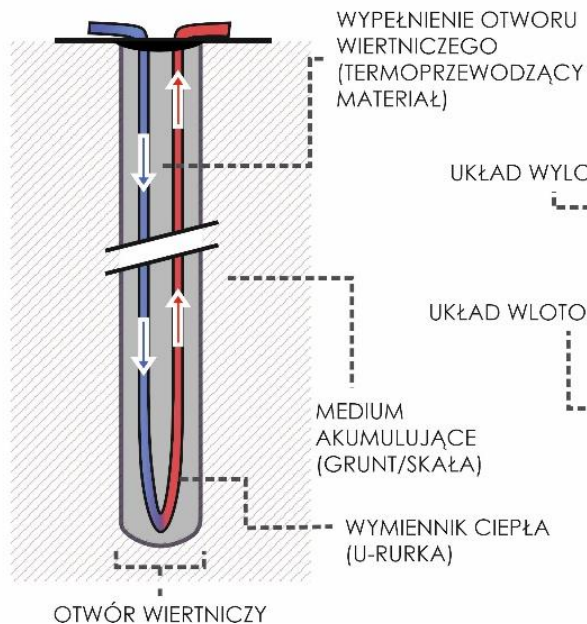
### 3.1. BTES. Otworowe magazyny ciepła

**BTES** (ang. *Borehole Thermal Energy Storage*) – jest to podziemny, bezzbiornikowy, otworowy magazyn ciepła, gdzie rolę czynnika akumulacyjnego pełni grunt lub skała.

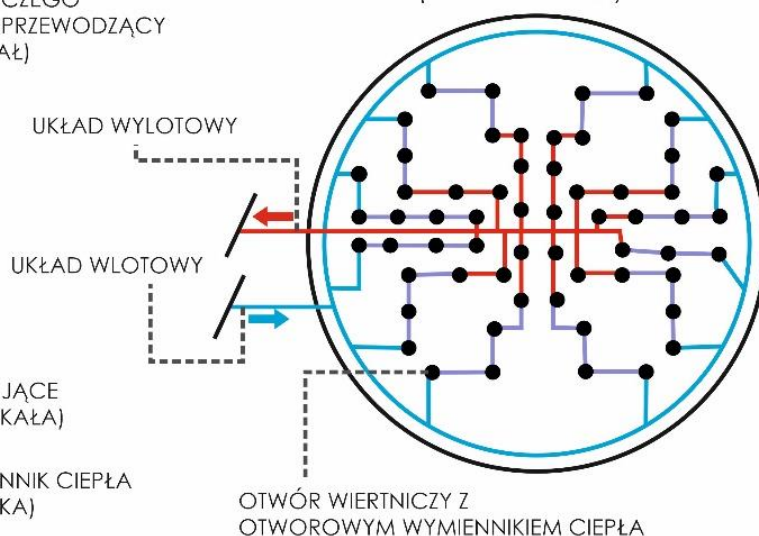
Głębokość posadowienia magazynu wynosi od 30 do 200 m p.p.t. Konstrukcja tego typu może operować w zakresie niskich temperatur (do 20 °C), średnich temperatur (20-50 °C) oraz wysokich temperatur (powyżej 50 °C) i pozwala na sezonowe akumulowanie energii cieplnej i chłodu (temperatury odnoszą się do temperatury w magazynie). Magazyny typu BTES znajdują zastosowanie w ciepłownictwie sieciowym, umożliwiając ogrzewanie i chłodzenie budynków wielkopowierzchniowych i obiektów przemysłowych. Magazyn może być ładowany ciepłem pochodzącym z paneli fotowoltaicznych PV oraz hybrydowych PVT, ciepłem odpadowym np. z procesów przemysłowych, pompami ciepła, ciepłem geotermalnym bądź dowolną kombinacją powyższych. Sprawność cieplna magazynu wynosi od 5 do 55% (Delta Energy & Environment Ltd., 2016).

BTES jest bezzbiornikowym magazynem, opartym na instalacji pionowych otworowych wymienników ciepła (ang. Borehole Heat Exchangers – BHE) o określonej głębokości, w zależności od warunków (Rysunek 5). Wymienniki znajdują się zazwyczaj w odległości od 2 do 5 m od siebie (Rysunek 6). Najbardziej popularnym rodzajem BHE jest pojedyncza bądź podwójna U-rurka z tworzywa sztucznego, w której krąży czynnik roboczy (woda lub roztwór glikolu). Przepływ nośnika sterowany jest systemem pomp obiegowych. Otwór z wymiennikiem wypełniany jest zaczynem cementowym o wysokiej przewodności termicznej, dla zapewnienia dobrego kontaktu termicznego wymiennika z górotworem.

## OTWOROWY WYMIENNIK CIEPŁA



## PRZYKŁADOWY ROZKŁAD WYMIENNIKÓW CIEPŁA W MAGAZYNIE BTES (SYSTEM GRZANIA)



**Rysunek 5 Konstrukcja i zasady działania BTES (ang. Borehole Thermal Energy Storage)**

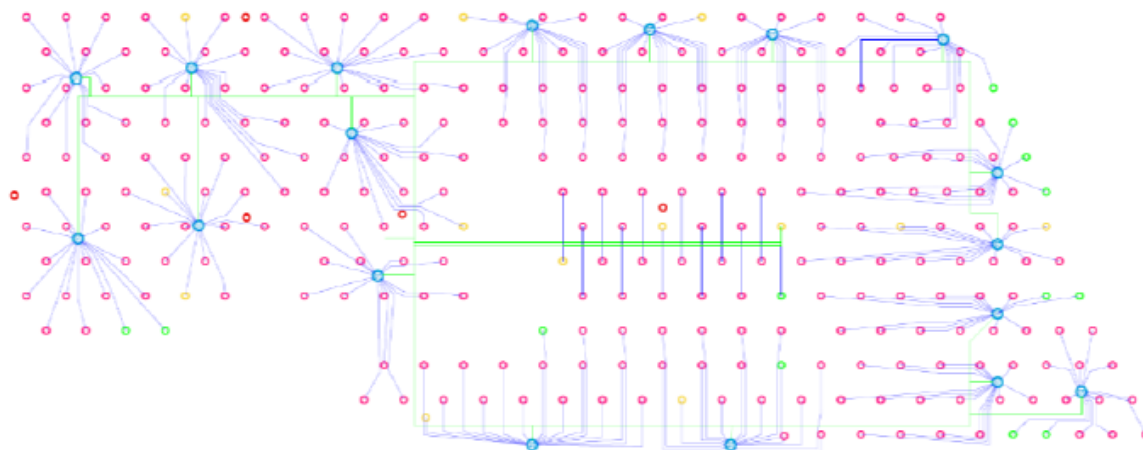


**Rysunek 6 Przyłącza od pionowych wymienników ciepła w magazynie BTES podczas konstrukcji w Drammen (Norwegia) (<https://lkab.com/en/news/lkab-wassara-finalist-in-helsinki-energy-challenge/>)**

Przykładem zastosowania technologii BTES w Polsce jest instalacja 192 wymienników ciepła na potrzeby ogrzewania i chłodzenia sklepu wielkopowierzchniowego IKEA w Szczecinie (Rysunek 7). Otworowy magazyn ciepła pracuje także w Lidzbarku Warmińskim (projekt Ciepłownia Przyszłości) hybrydowo, z systemem PTES (Rysunek 8).



**Rysunek 7 Montaż pionowych wymienników ciepła na potrzeby magazynowania ciepła dla sklepu wielkopowierzchniowego IKEA Szczecin (<https://www.sator.pl/pl/energia/ikea-szczecin--wykonanie-otworow-wiertniczych-celem-wykorzystania-ciepla-ziemi,495.html>)**



**Rysunek 8 Rozmieszczenie odwiertów geotermalnych, połączeń poziomych oraz studni rozdzielaczych magazynu ciepła BTES pod zbiornikiem PTES w Ciepłowni Przyszłości (Euros Energy, 2024)**

Dla efektywnej pracy magazynu ciepła niezbędne jest kompleksowe rozpoznanie podłoża. Należy rozpoznać głębokość, miąższość i wahania sezonowe warstwy wodonośnej, kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych, litologię i anizotropię podłoża oraz wartość strumienia ciepłego z ziemi. Wymienniki magazynu BTES umieszczane są w otworach przechodzących przez grunty i skały, gdzie parametry górotworu wpływają na wydajność instalacji. Właściwości i parametry podłoża możliwe do określenia znajdują się w tabeli (Tabela 1).

Parametry konstrukcyjne i materiałowe magazynu ciepła w formie BTES:

- średnica i długość wymienników,
- rodzaj wymiennika (pojedyncza U-rurka, podwójna U-rurka, inne),
- grubość ścianek wymienników i ich oporność termiczna,
- parametry płynu krążącego w wymienniku (przewodność cieplna, pojemność cieplna, lepkość, temperatura zamarzania),
- przewodność cieplna materiału uszczelniającego,
- prędkość przepływu i warunki przepływu (turbulentny, laminarny) w wymienniku,
- rozmieszczenie wymienników,
- ułożenie wymienników (pionowe, pochyłe),
- ułożenie wymiennika w stosunku do kierunku przepływu wód podziemnych.

Przegląd istniejących instalacji zagranicznych pozwala na oszacowanie kosztów energii cieplnej pozyskiwanej z magazynów typu BTES. Średni koszt energii dla tych instalacji może wynosić pomiędzy 0,4 a 4 €/kWh (Bourdoncle, 2020), lub 14-60 €/m<sup>3</sup> (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016). Kluczowym elementem jest dokładne i wydajne zaprojektowanie odwiertów w podłożu, ponieważ koszt wierceń może wynosić do 50% całej inwestycji (Kallesøe, 2019).

Poziom gotowości technologicznej TRL (ang. Technology Readiness Level) dla magazynów BTES wynosi 8 – 9 (demonstracja ostatecznej formy technologii oraz technologia gotowa do wdrożenia).

### **3.2. PTES. Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych**

**PTES (ang. Pit Thermal Energy Storage)** – jest to przypowierzchniowy, zbiornikowy magazyn ciepła, gdzie rolę czynnika akumulacyjnego pełni woda lub mieszanina wody i gruntu (najczęściej żwiru).

Głębokość posadowienia magazynu wynosi od 5 do 15 m p.p.t. Konstrukcja tego typu może operować w zakresie temperatur 10-90 °C i pozwala na sezonowe akumulowanie energii cieplnej. Magazyny typu PTES znajdują zastosowanie w ciepłownictwie sieciowym, umożliwiają ogrzewanie budynków wielkopowierzchniowych i budownictwa wielomieszkaniowego oraz obiektów przemysłowych. Magazyn może być ładowany ciepłem pochodzącym z paneli fotowoltaicznych PV oraz hybrydowych PVT, ciepłem odpadowym np. z procesów przemysłowych, pompami ciepła bądź dowolną kombinacją powyższych. Sprawność cieplna magazynu wynosi 50-90% (Delta Energy & Environment Ltd., 2016).

PTES jest sztucznym zbiornikiem wykonywanym najczęściej w kształcie odwróconego, ściętego ostrosłupa, zwieńczony pływającą pokrywą, która pełni funkcję izolacyjną (Rysunek 9). Ściany magazynu również pełnią funkcje izolacji i są wykonywane ze szczelnej geomembrany. W przypadku PTES wszystkie ściany magazynu wykonywane są z tworzyw sztucznych, nie wymagana jest kosztowna konstrukcja nośna ze względu na zrównoważenie sił statycznych na bokach oraz dole konstrukcji otoczonej gruntem (szczególnie w przypadku PTES wypełnionych mieszaniną żwiru z wodą).

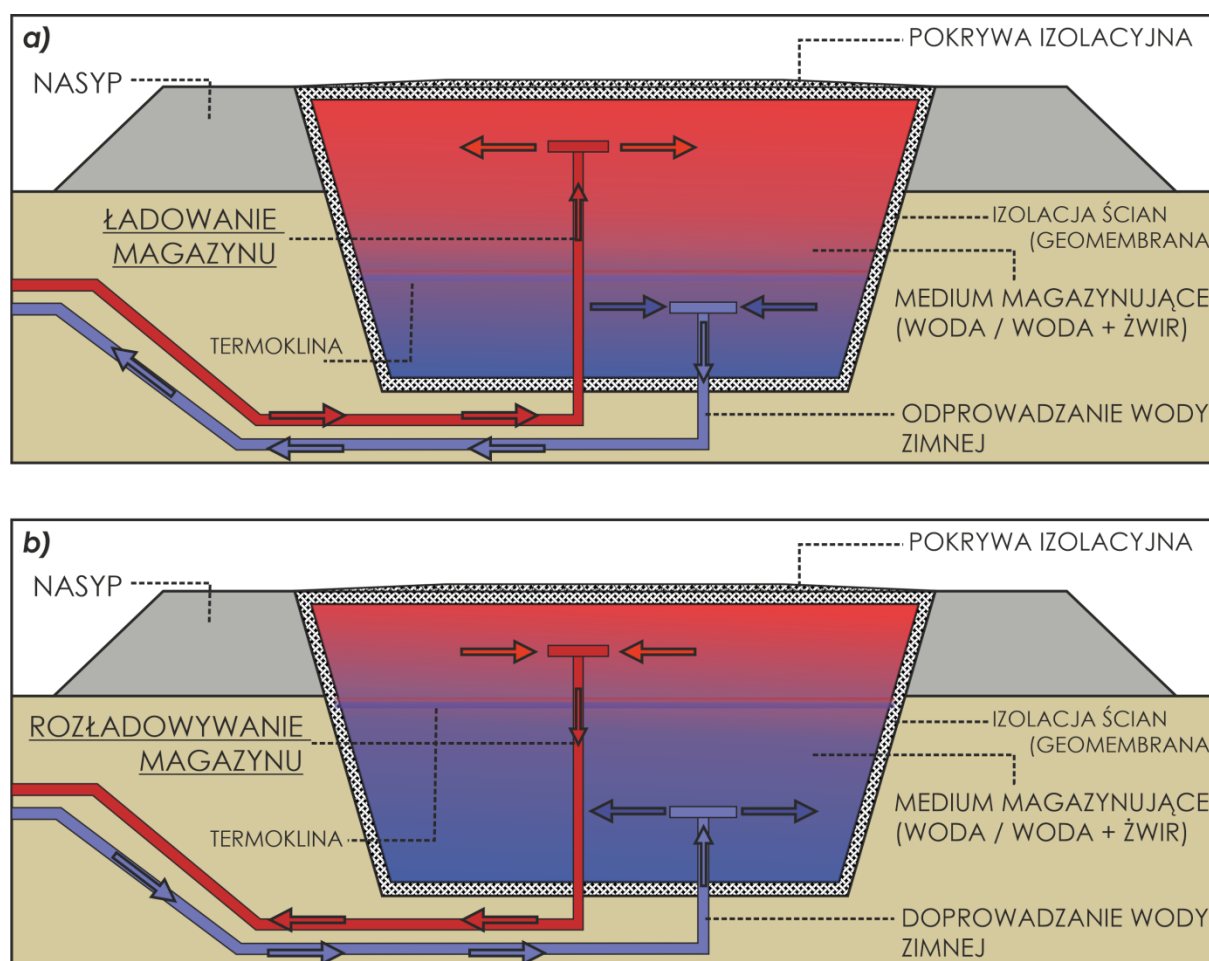
Nachylenie ścian PTES powinno być możliwie jak największe, ze względu na zmniejszenie stosunku objętości do powierzchni zbiornika, który wpływa na możliwe straty ciepła. Przy bardziej stromych ścianach, powierzchnia zbiornika, która jest w bezpośrednim kontakcie z gruntem, zmniejsza się, dzięki czemu łatwiejsze jest zredukowanie strat ciepła, utrzymanie stratyfikacji termicznej, a tym

samym, zmniejszenie kosztów. Przy zbiornikach o objętości powyżej 10 tys. m<sup>3</sup> zalecany jest jednak kąt nachylenia ścian bocznych około 30°, aby zachować stateczność ścian (Xiang i in., 2022).

Medium magazynujące o względnie wysokiej temperaturze znajduje się w górnej części zbiornika, a o stosunkowo niskiej w dolnej. W przypadku wypełnienia PTES samą wodą warstwy te oddzielone są warstwą dyspersyjną (tzw. termokliną).

Aby móc pobierać energię z magazynu stosuje się układy ładowania i rozładowywania, składające się z przyłączy rurowych: najczęściej stosuje się dwa przyłącza (dyfuzory), jeden przy dnie, a drugi na górze magazynu (Rysunek 9). Podczas ładowania magazynu zimna woda pobierana jest z dołu zbiornika, a gorąca woda uzupełniania jest od góry. Podczas wyładowywania magazynu, gorąca woda pobierana jest z góry, a zimna uzupełniania od dna. Wymiana ciepła w magazynie może się również odbywać za pomocą zamkniętych wymienników ciepła, umieszczonych w zbiorniku.

Ciepło zmagazynowane w PTES może być przekazywane na bufor, stanowić dolne źródło dla pomp ciepła, bądź bezpośrednio zasilać sieć ciepłowniczą (w przypadku wypełnienia zbiornika samą wodą).



**Rysunek 9 Konstrukcja i zasady działania PTES (ang. Pit Thermal Energy Storage  
a) schemat ładowania magazynu, b) schemat rozładowywania magazynu**

Przykładową instalacją PTES w Polsce jest zbiornik o pojemności 15 tys. m<sup>3</sup> w Lidzbarku Warmińskim, który zbudowany jest bezpośrednio nad zespołem prawie 300 pionowych wymienników ciepła (Rysunek 10, Rysunek 11). Na świecie realizowane są obecnie inwestycje wykorzystujące PTES o bardzo dużej objętości, nawet 200 tys. m<sup>3</sup> (Rysunek 12).



**Rysunek 10 Magazyn ciepła PTES w Lidzbarku Warmińskim podczas montażu pokrywy (Euros Energy, 2024)**



**Rysunek 11 Magazyn ciepła PTES w Lidzbarku Warmińskim wraz z powietrznymi pompami ciepła zainstalowanymi na wale (Euros Energy, 2024)**

Podłoże, na którym planowany jest PTES, musi umożliwiać wykonanie wykopu. Preferowany jest taki rodzaj gruntu, który pozwala na wykorzystanie urobku w celu utworzenia nasypu wokół instalacji. Do wykonania wydajnej instalacji niezbędna jest znajomość litologii podłoża oraz głębokość, miąższość i wahania sezonowe warstwy wodonośnej oraz kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych.

W przypadku zbiornikowych przypowierzchniowych magazynów ciepła wykonuje się badania podłoża na potrzeby posadowienia w gruncie zbiornika oraz badania parametrów termicznych gruntu otaczającego instalację (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna, pojemność cieplna) w celu określenia możliwości izolacyjnych gruntu i przewidywania strat ciepła. Właściwości i parametry podłoża możliwe do określenia znajdują się w tabeli (Tabela 1).



**Rysunek 12 Magazyn ciepła PTES w Vojens (Dania) o pojemności 200 tys. m<sup>3</sup>**  
 (<https://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/>; Esri Basemap)

W przypadku formowania nasypu z urobku zaleca się wykonać badania jego przydatności do wbudowania w nasyp. Jeżeli PTES wypełniany jest zarówno wodą jak i żwirem warto jest wykonać badania kruszywa akumulującego energię w zbiorniku, takie jak: uziarnienie, mineralogia lub petrografia oraz badania termiczne: przewodności termicznej, dyfuzyjności cieplnej i pojemności cieplnej.

Parametry konstrukcyjne i materiałowe magazynu ciepła w formie PTES obejmują:

- geometrię zbiornika,
- powierzchnię zbiornika,
- rozmieszczenie i technologię punktów wlotowych i wylotowych (dyfuzorów), bądź wymiennika ciepła,
- materiał ścian wewnętrznej,
- nachylenie ścian zbiornika,
- materiał izolacyjny,
- materiał pokrywy,
- rodzaj medium wypełniającego zbiornik.

Przegląd istniejących instalacji zagranicznych pozwala na oszacowanie kosztów energii cieplnej pozyskiwanej z magazynów typu PTES. Kluczowym czynnikiem dla tego typu systemów jest ich skala, dlatego też dla magazynów PTES o niewielkich objętościach (1 500-10 000 m<sup>3</sup>) koszty mogą wynosić w przedziale od 67 do 150 €/m<sup>3</sup> lub 1,05-5,17 €/kWh, natomiast dla większych obiektów (60

000-70 000 m<sup>3</sup>) koszty te spadają do 35 €/m<sup>3</sup> i 0,37-0,42 €/kWh (Jensen, 2014). Koszty inwestycyjne i operacyjne są także bardzo zależne od takich czynników jak: warunki geologiczne, koszty i skomplikowanie robót ziemnych czy rodzaj użytych materiałów, który ma szczególne znaczenie przy ograniczeniu strat ciepła i zwiększeniu wydajności magazynu. Przy dobieraniu odpowiedniej objętości i zastosowaniu wysokiej jakości materiałów konstrukcyjnych koszty typowego magazynowania metodą PTES mogłyby spaść poniżej 30 €/m<sup>3</sup> (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016) oraz kosztów energii poniżej 1 €/kWh (Bourdoncle, 2020).

Poziom gotowości technologicznej TRL dla magazynów PTES wynosi 8 – 9 (demonstracja ostatecznej formy technologii oraz technologia gotowa do wdrożenia).

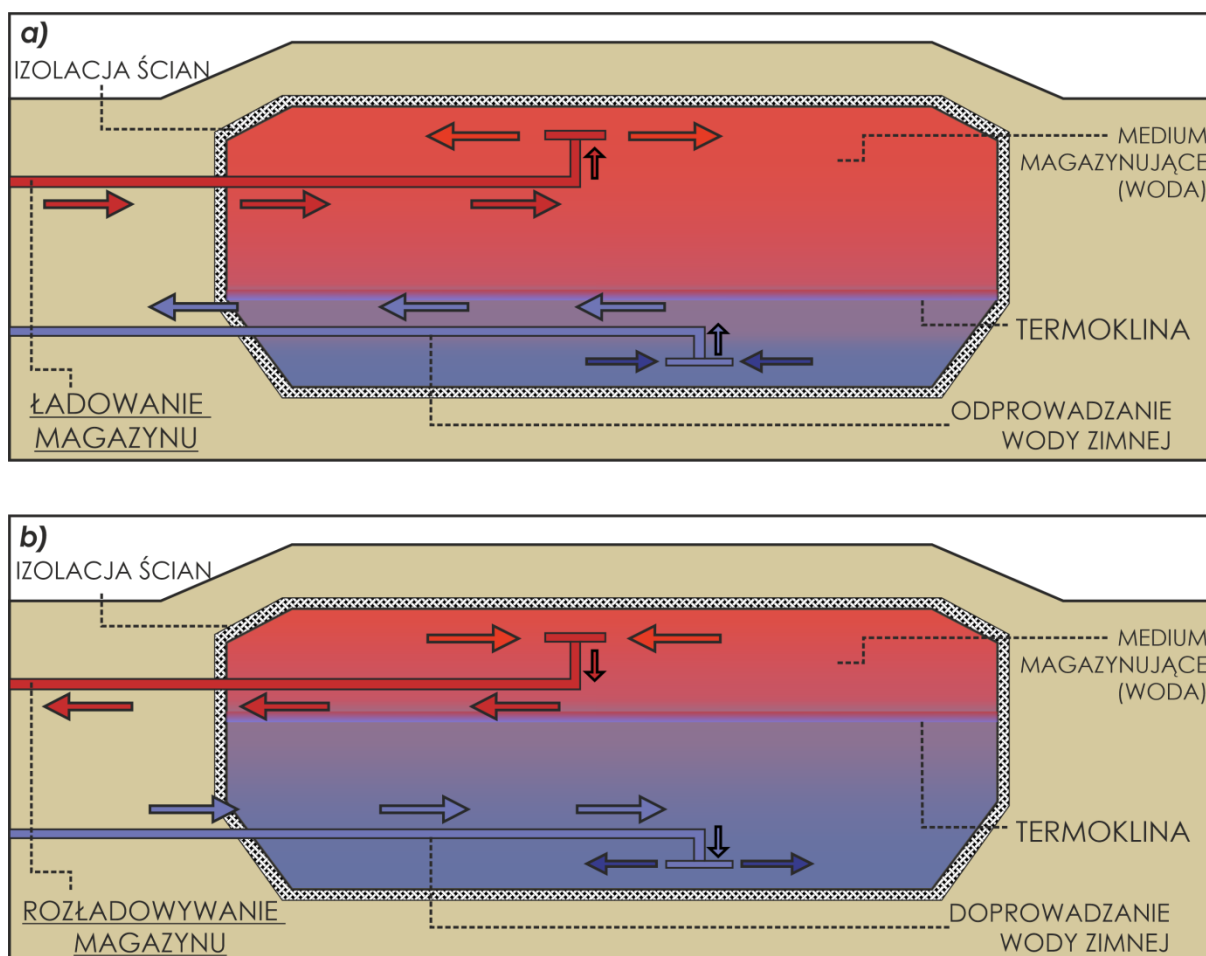
### **3.3. TTES. Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych**

**TTES (ang. Tank Thermal Energy Storage)** – jest to podziemny, zbiornikowy magazyn ciepła, gdzie rolę czynnika akumulacyjnego pełni woda.

Głębokość posadowienia magazynu wynosi od 5 do 15 m p.p.t. Konstrukcja tego typu może operować w zakresie temperatur 10-98 °C i pozwala na krótkoterminowe i sezonowe akumulowanie energii cieplnej. Magazyny typu TTES znajdują zastosowanie w ciepłownictwie sieciowym, umożliwiając ogrzewanie budynków wielkopowierzchniowych i budownictwa wielomieszkaniowego, budynków jednorodzinnych oraz obiektów przemysłowych. Często wykorzystywane są jako bufor ciepła. Magazyn może być ładowany ciepłem pochodzącym z paneli fotowoltaicznych PV oraz hybrydowych PVT, ciepłem odpadowym np. z procesów przemysłowych, pompami ciepła bądź dowolną kombinacją powyższych. Sprawność cieplna magazynu wynosi od 50 do 90% (Delta Energy & Environment Ltd., 2016).

TTES jest sztucznym zbiornikiem o konstrukcji betonowej, ze stali nierdzewnej bądź wzmocnionych tworzyw sztucznych. Budowany jest in situ, bądź z prefabrykowanych elementów. Przewagą umieszczenia tego zbiornika pod ziemią, w porównaniu do zbiorników naziemnych o podobnej konstrukcji, jest zrównoważenie sił statycznych działających na ściany systemu i tym samym możliwość budowy cieńszych ścian. TTES może być umieszczony we wkopie, bądź posadowiony nad poziomem terenu i obsypany gruntem. Zbiornik jest izolowany od zewnątrz i od dołu np. granulatem szkła piankowego oraz od góry i na ścianach membraną ze szkłem ekspandowanym.

Gorąca woda gromadzona jest w górnej części zbiornika, natomiast zimna w dolnej. Warstwy te oddzielone są warstwą dyspersyjną (tzw. termokliną). Aby móc pobierać energię z magazynu stosuje się układy ładowania i rozładowywania, składające się z przyłączy rurowych: najczęściej stosuje się dwa przyłącza (dyfuzory), jeden przy dnie, a drugi na górze magazynu (Rysunek 13). Podczas ładowania magazynu zimna woda pobierana jest z dołu zbiornika, a gorąca woda uzupełniania jest od góry. Podczas wyładowywania magazynu, gorąca woda pobierana jest z góry, a zimna uzupełniania od dna. Ciepło zmagazynowane w TTES może bezpośrednio zasilać sieć ciepłowniczą.



**Rysunek 13 Konstrukcja i zasady działania TTES (ang. Tank Thermal Energy Storage)  
a) schemat ładowania magazynu, b) schemat rozładowywania magazynu**

Przykładową instalacją TTES jest zbiornik w Monachium w Niemczech, budowany nad powierzchnią terenu i obsypany (Rysunek 14). Przykładem TTES budowanego pod ziemią jest zbiornik w Attenkirchen (Niemcy), który jest instalacją hybrydową – współpracuje z 90 pionowymi wymiennikami ciepła (Rysunek 15).

W przypadku TTES podłoże, w którym planowany jest zbiornik, musi umożliwiać wykonanie wykopu. Do wykonania wydajnej instalacji niezbędna jest znajomość litologii podłoża oraz głębokość, miąższość warstwy wodonośnej i wahania sezonowe poziomu wód podziemnych oraz kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych.

W przypadku zbiornikowych podziemnych magazynów ciepła wykonuje się badania parametrów termicznych gruntu otaczającego instalację (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna, pojemność cieplna) w celu określenia możliwości izolacyjnych gruntu i przewidywania strat ciepła. Właściwości i parametry podłoża możliwe do określenia znajdują się w tabeli (Tabela 1).

Parametry konstrukcyjne i materiałowe magazynu ciepła w formie TTES obejmują:

- geometrię zbiornika,
- powierzchnię zbiornika,
- rozmieszczenie i technologię punktów wlotowych i wylotowych (dyfuzorów),
- materiał ściany wewnętrznej,
- materiały izolacyjne.



**Rysunek 14** Magazyn ciepła TTES wykonany nad ziemią i obsypany (Monachium, Niemcy) (Google Map Street view, <https://sdg21.eu/en/db/solare-nahwaerme-ackermannbogen>)



**Rysunek 15** Podziemny magazyn ciepła TTES w trakcie budowy (Benner i in., 2003)

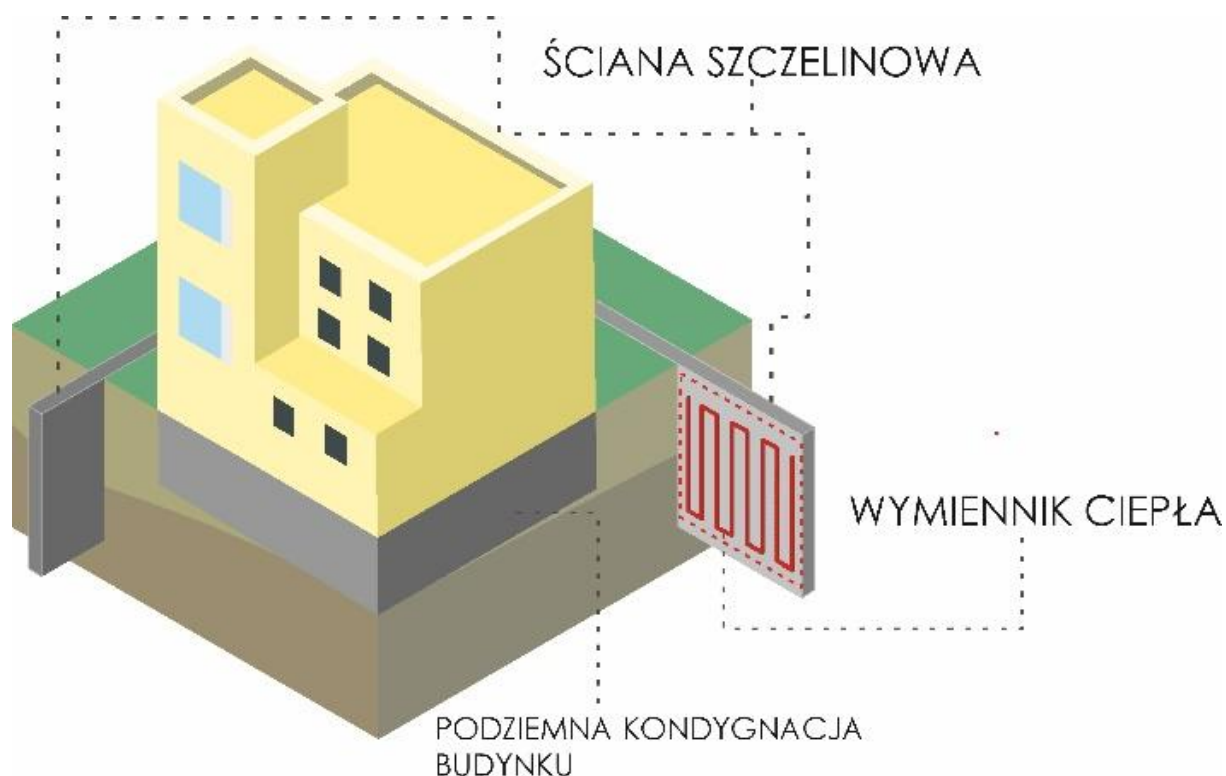
Na podstawie istniejących instalacji zagranicznych oszacowany średni koszt energii dla dużych instalacji może wynosić poniżej 1 €/kWh, natomiast przy zbiornikach zasilających domy jednorodzinne wynosi pomiędzy 30 a 215 €/kWh. Koszty w przypadku niewielkich zbiorników są zdecydowanie wyższe niż przy dużych instalacjach. Ceny magazynowania dla zbiorników poniżej 1000 m<sup>3</sup> wynoszą około 450-470 €/m<sup>3</sup>, dla zbiorników o pojemności od 1000 do 10000 m<sup>3</sup> między 170 a 240 €/m<sup>3</sup>, natomiast przy zbiornikach powyżej 10000 m<sup>3</sup> pojemności koszty spadają do ok. 105 €/m<sup>3</sup> (Mangold i Deschaintre, 2015; Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016).

Poziom gotowości technologicznej TRL dla magazynów TTES wynosi 8 – 9 (demonstracja ostatecznej formy technologii oraz technologia gotowa do wdrożenia).

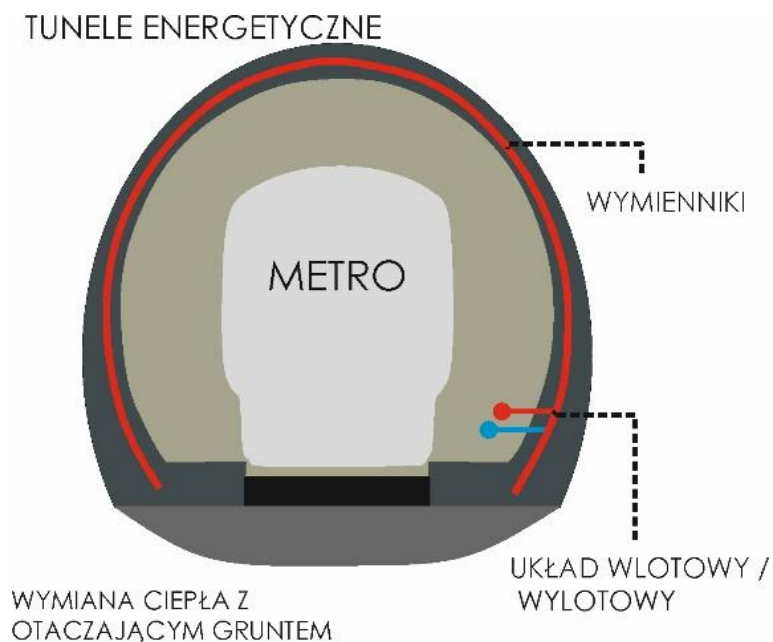
### 3.4.EF(TG). Fundamenty energetyczne, geotechniczne konstrukcje termoaktywne

**EF (ang. Energy Foundations), TG (ang. Thermal Geostructures)** – są to elementy konstrukcji budowlanej, w jej najniższej części, mające za zadanie przekazanie ciężaru budowli w głębsze części podłoża gruntowo-skalnego (Biernatowski, 1984), połączone z wymiennikami ciepła. Magazynowanie ciepła za pomocą fundamentów energetycznych lub konstrukcji termoaktywnych odbywa się w podłożu budowlanym, gdzie rolę czynnika akumulacyjnego pełni grunt lub skała.

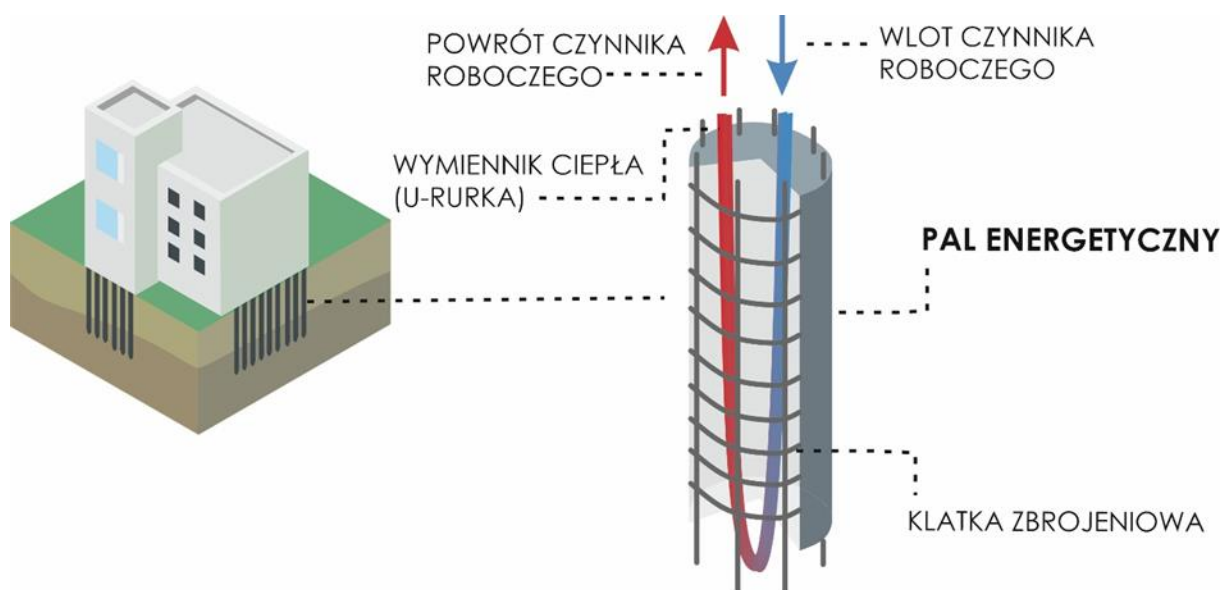
Fundamenty energetyczne zawierają wbudowane w fundamenty lub konstrukcje podziemne zwoje rur, np. polietylenowych, w których krąży czynnik roboczy (najczęściej mieszanina wody i glikolu) będący nośnikiem ciepła. Zastosowanie wbudowanego wymiennika umożliwia efektywną wymianę energii pomiędzy budynkiem i podłożem. Funkcję fundamentu energetycznego mogą pełnić m.in. pale, obudowy tuneli, ściany szczelinowe czy płyty fundamentowe (Rysunek 16, Rysunek 17, Rysunek 18).



Rysunek 16 Konstrukcja energetycznej ściany szczelinowej



**Rysunek 17 Konstrukcja tunelu energetycznego**



**Rysunek 18 Konstrukcja termopali**

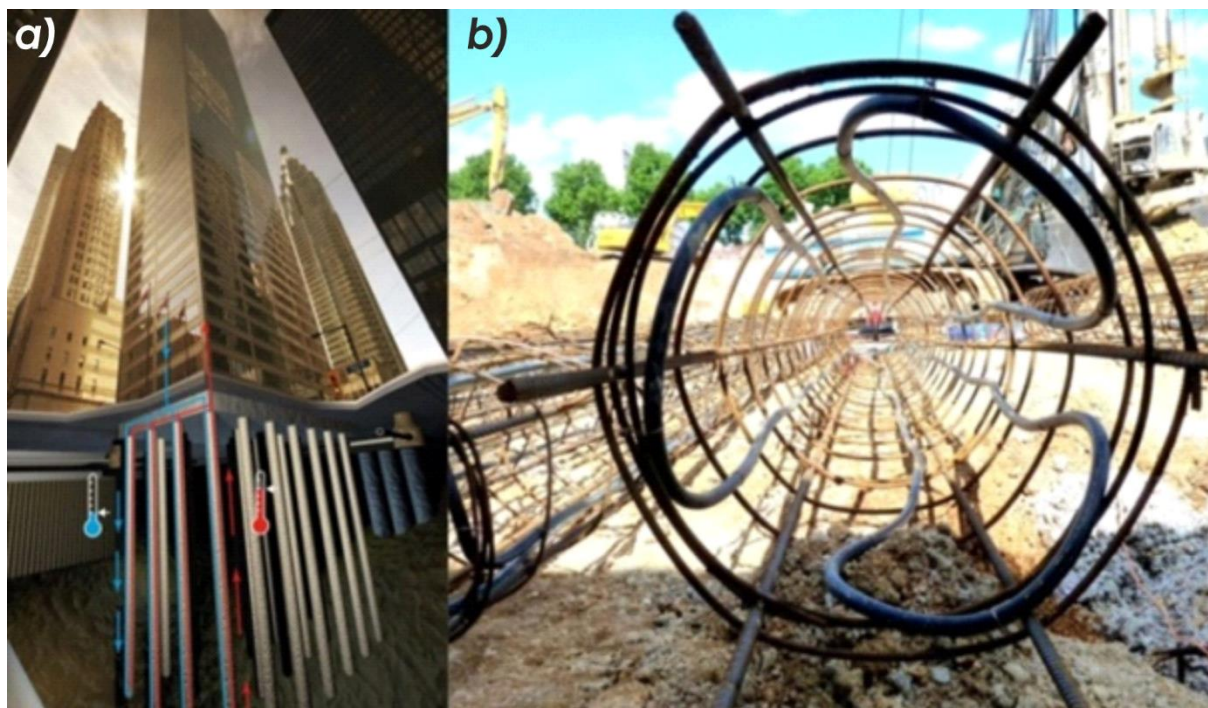
Zdecydowana większość budynków wysokościowych i podziemnej infrastruktury miejskiej (jak parkingi podziemne, tunele i stacje metra) posiada fundamenty lub podobne konstrukcje o dużych powierzchniach, które mogą być aktywowane termicznie do celów grzewczych i chłodniczych (Rysunek 19, Rysunek 20).

Głębokość wykonania instalacji wynosi do 30 m p.p.t. Maksymalna temperatura czynnika roboczego zależy od szeregu czynników, w tym od parametrów instalacji, zachowania integralności strukturalnej materiałów, oraz wytrzymałości mechanicznej i odporności gruntu na zmiany temperatury (VDI 4640, 2019). Bardzo ważne jest, aby czynnik roboczy nigdy nie osiągnął temperatur w okolicach 0 °C i niższych, ponieważ mogłoby to doprowadzić do przemarznięcia i uszkodzenia elementów fundamentu. Zalecane zakresy temperatur dla geotermalnego wykorzystania fundamentów są niewielkie, mieszczą się w przedziale od 2 °C do 30 °C (Alberdi-Pagola, 2018). Należy pamiętać, że

fundamenty energetyczne odpowiadają przede wszystkim za przekazywanie obciążeń budowli na podłoże, a ich aktywna praca termiczna nie może znacząco wpływać na nośność konstrukcji.



Rysunek 19 Tunel energetyczny, wizualizacja (<https://actu.epfl.ch/news/engineering-heat-out-of-metro-tunnels/>)



Rysunek 20 Termopala

a) wizualizacja, b) konstrukcja termopala (zbrojenie z wymiennikami ciepła) (<https://www.epfl.ch/labs/lms/research-research-fields-energy-ressources/>)

Magazynowanie energii cieplnej może odbywać się w okresie krótkoterminowym lub sezonowym, przy czym możliwość połączenia tych dwóch rozwiązań przedstawia największe korzyści ekonomiczne. Fundamenty energetyczne, występujące w roli magazynu ciepła, ładowane są głównie poprzez odbiór energii (ciepła odpadowego) z instalacji HVAC (ang. heating, ventilation, air conditioning) oraz oddziaływanie promieniowania słonecznego. Dodatkowo ten typ magazynu może być ładowany ciepłem pochodzącym z paneli fotowoltaicznych PV oraz hybrydowych PVT, pompami ciepła bądź dowolną kombinacją powyższych. Fundamenty energetyczne, a w szczególności termopale, znajdują zastosowanie w budownictwie wielkopowierzchniowym i wielomieszaniowym, służą ogrzewaniu i chłodzeniu infrastruktury transportowej oraz budynków jednorodzinnych.

Przykładową instalacją fundamentów energetycznych w Polsce jest budynek Archiwum Narodowego w Krakowie, w którym ciepło i chłód dostarczane są dzięki 117 palom termoaktywnym, które działają wraz z 24 pionowymi wymiennikami ciepła oraz pompami powietrznymi (Rysunek 21).



**Rysunek 21 Archiwum Narodowe w Krakowie – budynek wykorzystujący technologię pali energetycznych.**  
(<https://krakow.wyborcza.pl/krakow/7,44425,26355647,najwieksza-przeprowadzka-w-historii-archiwow-panstwowych.html>)

W przypadku fundamentów energetycznych wykonuje się standardowe badania podłoża na potrzeby posadowienia i obliczeń projektowych obiektów budowlanych. Dodatkowo wykonuje się badania termiczne na potrzeby wymiany energii cieplnej i jej magazynowania w podłożu. Właściwości i parametry podłoża możliwe do określenia znajdują się w tabeli (Tabela 1).

Zagadnienie poprawnego zaprojektowania i wykonania instalacji **EF(TG)** jest szczególnie złożonym problemem inżynierskim wymagającym skoordynowania prac ekspertów z różnych dziedzin. Parametry konstrukcyjne i materiałowe magazynu ciepła w formie fundamentów energetycznych obejmują:

- typ i wymiary fundamentów (termopale, płyty fundamentowe, ściany tuneli, ściany szczelinowe),
- głębokość wykonania fundamentów,
- położenie, rozmieszczenie i rozstaw fundamentów,
- sposób montażu fundamentu,

- szczegóły zbrojenia.
- właściwości betonu fundamentów energetycznych,
- rodzaj wymiennika (pojedyncza U-rurka, podwójna U-rurka, włókniny energetyczne i inne),
- grubość ścianek wymienników i ich oporność termiczną,
- parametry płynu krążącego w wymienniku (przewodność cieplna, pojemność cieplna, lepkość, temperatura zamarzania),
- przewodność cieplną termocementu,
- prędkość i warunki przepływu (przepływ turbulentny, przepływ laminarny) w wymienniku,
- przestrzenne rozmieszczenie wymienników,
- ułożenie wymiennika w stosunku do kierunku przepływu wód podziemnych.

Poziom gotowości technologicznej TRL dla magazynów w formie fundamentów energetycznych (w zależności od typu termoaktywnej konstrukcji) wynosi 6 – 9.

### 3.5. Charakterystyka podziemnych magazynów ciepła

Technologie podziemnego magazynowania ciepła są zróżnicowane pod względem trybu pracy, parametrów konstrukcyjnych, możliwej wydajności czy wrażliwości na czynniki zewnętrzne (Tabela 1). Analiza potrzeb energetycznych, technicznych oraz warunków środowiskowych lokalizacji pozwala na dobór optymalnego rodzaju magazynu ciepła tak, aby zachować jak najlepszą produktywność i ekonomiczność przedsięwzięcia.

**Tabela 1 Charakterystyka cech różnych rodzajów podziemnych magazynów ciepła**

Cechy magazynu	Rodzaj podziemnego magazynu ciepła			
	BTES	PTES	TTES	EF(TG)
Tryb pracy	• sezonowe	• krótkoterminowe • sezonowe	• krótkoterminowe • sezonowe	• krótkoterminowe • sezonowe
Głębokość konstrukcji	30-300 m p.p.t.	5-15 m p.p.t.	5-15 m p.p.t.	< 30 m p.p.t (w zależności od konstrukcji fundamentu) (nie dotyczy tuneli energetycznych)
Typ magazynu	bezzbiornikowy	zbiornikowy	zbiornikowy	bezzbiornikowy
Rodzaj medium akumulującego	• grunt • skała	• woda • woda-żwir-piasek	• woda	• grunt • skała
Rodzaj zasilanego obiektu	• sieci ciepłownicze • budynki wielkopowierzchniowe • zastosowanie przemysłowe	• sieci ciepłownicze • budynki wielkopowierzchniowe • zastosowanie przemysłowe • budynki wielomieszkaniowe	• sieci ciepłownicze • budynki wielkopowierzchniowe • zastosowanie przemysłowe • budynki wielomieszkaniowe • budynki jednorodzinne	• budynki wielkopowierzchniowe • budynki jednorodzinne • infrastruktura transportowa
Temperatura medium magazynującego	• niska temperatura (do 20 °C) • średnia temperatura (20-50 °C) • wysoka temperatura (powyżej 50 °C)	10 - 90 °C	10 - 98 °C	do 20 °C (termopale, ściany energetyczne, energetyczne płyty fundamentowe) do 60 °C (tunele energetyczne)
Funkcja magazynu	• ogrzewanie • chłodzenie	ogrzewanie	ogrzewanie	• ogrzewanie • chłodzenie
Sposób ładowania magazynu	• panele słoneczne • ciepło odpadowe • ciepło geotermalne • pompa ciepła (możliwa dowolna kombinacja powyższych)	• panele słoneczne • ciepło odpadowe • pompa ciepła (możliwa dowolna kombinacja powyższych)	• panele słoneczne • ciepło odpadowe • pompa ciepła (możliwa dowolna kombinacja powyższych)	• panele słoneczne • ciepło odpadowe • ciepło geotermalne • pompa ciepła (możliwa dowolna kombinacja powyższych)
Wrażliwość na warunki klimatyczne	• niska wrażliwość na zmiany temperatury powietrza • wysoka wrażliwość na wpływ opadów atmosferycznych w strefach przypowierzchniowych	wysoka wrażliwość na zmiany temperatury powietrza	wysoka wrażliwość na zmiany temperatury powietrza	średnia wrażliwość na zmiany temperatury powietrza
Poziomy dojrzałości technologicznej na	8-9	8-9	8-9	6-9

Cechy magazynu	Rodzaj podziemnego magazynu ciepła			
	BTES	PTES	TTES	EF(TG)
świecie (TRL 1-9)				
Wydajność	5-55%	do 80 %	50-90 %	Brak danych
Wymagania geologiczne i hydrogeologiczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• podłoże umożliwiające wiercenie otworów</li> <li>• przewodność termiczna w zakresie 1,5-2,5 W/m×K</li> <li>• wysoka pojemność cieplna ośrodka <ul style="list-style-type: none"> <li>• występowanie wód podziemnych/ szczelinowych o niskim przepływie</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• podłoże umożliwiające wykonanie wkopu</li> <li>• preferowany brak wód podziemnych</li> <li>• grunt umożliwiający wykorzystanie urobku jako nasypu wokół instalacji</li> <li>• niska przewodność termiczna ośrodka</li> <li>• niska przewodność hydrauliczna ośrodka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• podłoże umożliwiające wykonanie wkopu</li> <li>• preferowany brak wód podziemnych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wymagania geotechniczne budynku</li> <li>• przewodność termiczna w zakresie 1,5-2,5 W/m×K</li> <li>• wysoka pojemność cieplna ośrodka <ul style="list-style-type: none"> <li>• występowanie wód podziemnych/ szczelinowych o niskim przepływie</li> <li>• niska przewodność hydrauliczna ośrodka</li> </ul> </li> </ul>
Parametry konstrukcyjne i materiałowe magazynu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• średnica i długość wymienników</li> <li>• rodzaj wymiennika (pojedyncza U-rurka, podwójna U-rurka, wymienniki koncentryczne, inne)</li> <li>• grubość ścianek wymienników i ich oporność termiczna</li> <li>• parametry płynu krążącego w wymienniku (przewodność cieplna, pojemność cieplna, lepkość, temperatura zamarzania)</li> <li>• przewodność cieplna materiału uszczelniającego</li> <li>• prędkość przepływu i warunki przepływu (turbulencja laminarna) w wymienniku <ul style="list-style-type: none"> <li>• rozmieszczenie wymienników</li> </ul> </li> <li>• ułożenie wymienników (pionowe, pochyłe)</li> <li>• ułożenie wymiennika w stosunku do kierunku przepływu wód podziemnych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geometria zbiornika</li> <li>• rozmieszczenie punktów wlotowych i wylotowych</li> <li>• powierzchnia zbiornika <ul style="list-style-type: none"> <li>• materiał ściany wewnętrznej</li> </ul> </li> <li>• nachylenie ścian zbiornika</li> <li>• materiał izolacyjny</li> <li>• materiał i technologia pokrywy</li> <li>• wypełnienie zbiornika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geometria zbiornika</li> <li>• rozmieszczenie punktów wlotowych i wylotowych</li> <li>• powierzchnia zbiornika <ul style="list-style-type: none"> <li>• materiał ściany wewnętrznej</li> <li>• materiały izolacyjne</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• typ i wymiary fundamentów</li> <li>• głębokość fundamentów</li> <li>• położenie, rozmieszczenie i rozstaw fundamentów</li> <li>• sposób montażu fundamentu, kolejność wykonywania prac <ul style="list-style-type: none"> <li>• szczegóły zbrojenia</li> <li>• właściwości betonu fundamentów energetycznych</li> </ul> </li> <li>• rodzaj wymiennika (pojedyncza U-rurka, podwójna U-rurka, inne) <ul style="list-style-type: none"> <li>• grubość ścianek wymienników i ich oporność termiczna</li> </ul> </li> <li>• parametry płynu krążącego w wymienniku (przewodność cieplna, pojemność cieplna, lepkość, temperatura zamarzania) <ul style="list-style-type: none"> <li>• przewodność cieplna materiału uszczelniającego</li> <li>• prędkość przepływu i warunki przepływu (turbulencja laminarna) w wymienniku <ul style="list-style-type: none"> <li>• rozmieszczenie wymienników</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• ułożenie wymiennika w stosunku do kierunku przepływu wód podziemnych</li> </ul>
Właściwości i parametry podłoża w szczególności w odniesieniu do normy EN 1997-2:2024 (po wprowadzeniu normy do katalogu Norm Polski w odniesieniu do wersji polskiej)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• litologia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• anizotropia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• głębokość występowania i miąższość poziomów wodonośnych</li> <li>• ciśnienie w warstwie/ach wodonośnej/ych <ul style="list-style-type: none"> <li>• sezonowe wahania zwierciadła/eł wód podziemnych</li> </ul> </li> <li>• kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych</li> <li>• strumień ciepła z ziemi</li> <li>• właściwości stanu (gęstość objętościowa, wilgotność, porowatość, szczelinowatość, nasiąkliwość, stopień zagęszczenia)</li> <li>• właściwości fizyczne (uziarnienie, granice konsystencji, stopień zwietrzenia skał, kształt okruchów i bloków skalnych)</li> <li>• właściwości chemiczne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• litologia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• anizotropia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• głębokość występowania i miąższość poziomów wodonośnych</li> <li>• ciśnienie w warstwie/ach wodonośnej/ych <ul style="list-style-type: none"> <li>• sezonowe wahania zwierciadła/eł wód podziemnych</li> </ul> </li> <li>• kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych</li> <li>• właściwości stanu (gęstość objętościowa, wilgotność, porowatość, szczelinowatość, nasiąkliwość, stopień zagęszczenia)</li> <li>• właściwości fizyczne (uziarnienie, granice konsystencji, stopień zwietrzenia skał, kształt okruchów i bloków skalnych, zagęszczalność)</li> <li>• właściwości chemiczne (zawartość węglanów,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• litologia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• anizotropia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• głębokość występowania i miąższość poziomów wodonośnych</li> <li>• ciśnienie w warstwie/ach wodonośnej/ych <ul style="list-style-type: none"> <li>• sezonowe wahania zwierciadła/eł wód podziemnych</li> </ul> </li> <li>• kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych</li> <li>• właściwości stanu (gęstość objętościowa, wilgotność, porowatość, szczelinowatość, nasiąkliwość, stopień zagęszczenia)</li> <li>• właściwości fizyczne (uziarnienie, granice konsystencji, stopień zwietrzenia skał, kształt okruchów i bloków skalnych, zagęszczalność)</li> <li>• właściwości chemiczne (zawartość węglanów,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• litologia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• anizotropia ośrodka gruntowo-skalnego</li> <li>• głębokość występowania i miąższość poziomów wodonośnych</li> <li>• ciśnienie w warstwie/ach wodonośnej/ych <ul style="list-style-type: none"> <li>• sezonowe wahania zwierciadła/eł wód podziemnych</li> </ul> </li> <li>• kierunek i prędkość przepływu wód podziemnych</li> <li>• właściwości stanu (gęstość objętościowa, wilgotność, porowatość, szczelinowatość, nasiąkliwość, stopień zagęszczenia)</li> <li>• właściwości fizyczne (uziarnienie, granice konsystencji, stopień zwietrzenia skał, kształt okruchów i bloków skalnych)</li> <li>• właściwości chemiczne (mineralogia, zawartość węglanów, zawartość substancji organicznej, zawartość innych związków</li> </ul>

Cechy magazynu	Rodzaj podziemnego magazynu ciepła			
	BTES	PTES	TTES	EF(TG)
	(mineralogia, zawartość węglanów, zawartość substancji organicznej, zawartość innych związków chemicznych) <ul style="list-style-type: none"> <li>właściwości geohdrauliczne (współczynnik filtracji)</li> <li>właściwości termiczne (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna pojemność cieplna)</li> </ul>	zawartość substancji organicznej, zawartość innych związków chemicznych) <ul style="list-style-type: none"> <li>wytrzymałość gruntów i skał</li> <li>szywność podłoża, ściśliwość i konsolidacja podłoża</li> <li>właściwości geohdrauliczne (np.: współczynnik filtracji)</li> <li>właściwości termiczne (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna pojemność cieplna)</li> </ul>	zawartość substancji organicznej, zawartość innych związków chemicznych) <ul style="list-style-type: none"> <li>wytrzymałość gruntów i skał</li> <li>szywność podłoża, ściśliwość i konsolidacja podłoża</li> <li>właściwości geohdrauliczne (np.: współczynnik filtracji)</li> <li>właściwości termiczne (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna pojemność cieplna)</li> </ul>	chemicznych) <ul style="list-style-type: none"> <li>wytrzymałość gruntów i skał <ul style="list-style-type: none"> <li>szywność podłoża, ściśliwość i konsolidacja podłoża</li> </ul> </li> <li>właściwości geohdrauliczne (np.: współczynnik filtracji)</li> <li>właściwości termiczne (przewodność termiczna, dyfuzyjność cieplna pojemność cieplna)</li> </ul>
<b>Ograniczenia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysokie straty ciepła</li> <li>wysokie koszty wiercenia otworów</li> <li>długi okres wygrzewania magazynu (3-5 lat) (dotyczy magazynowania na wysokim poziomie temperatury)</li> <li>ograniczenia geologiczne i hydrogeologiczne</li> <li>możliwe oddziaływanie na warstwę wodonosną</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoki koszt konstrukcji i izolacji</li> <li>możliwość awarii (przecieki, uszkodzenia)</li> <li>konieczność zachowania termokliny</li> <li>niska stratyfikacja termiczna medium magazynującego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoki koszt konstrukcji i izolacji</li> <li>możliwość awarii (przecieki, uszkodzenia)</li> <li>konieczność zachowania termokliny</li> <li>niska stratyfikacja termiczna medium magazynującego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>interdyscyplinarność instalacji</li> <li>konieczność utrzymywania temperatur minimalnych oraz maksymalnych, nie pogarszających nośności podłoża</li> </ul>
<b>Zalety</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>możliwość całkowitego zagospodarowania powierzchni nad magazynem</li> <li>niska wrażliwość na warunki klimatyczne</li> <li>największa opłacalność dla dużych inwestycji</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obniżenie kosztów ze względu na użycie mieszanki wodno-żwirowej</li> <li>możliwość wybudowania instalacji w niemal w dowolnej lokalizacji</li> <li>niski wpływ warunków geologicznych i hydrogeologicznych</li> <li>wysoka pojemność cieplna</li> <li>brak wpływu na warstwę wodonosną</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoki stopień dojrzałości technologii</li> <li>możliwość wybudowania instalacji w niemal w dowolnej lokalizacji</li> <li>niski wpływ warunków geologicznych i hydrogeologicznych</li> <li>wysoka pojemność cieplna <ul style="list-style-type: none"> <li>prosta konstrukcja instalacji</li> </ul> </li> <li>brak wpływu na warstwę wodonosną</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>łatwość instalacji</li> <li>instalacja wymienników nie odbiega od procedury wykonania fundamentu, element termoaktywny jest jego dodatkową funkcją</li> <li>możliwość stosowania mikropali w terenie z problematycznym podłożem</li> </ul>

## 4. Przegląd krajowych i zagranicznych magazynów ciepła

### 4.1. Otworowe magazyny ciepła - BTES

#### 4.1.1. Wybrane doświadczenia zagraniczne

Otworowe magazyny ciepła (BTES, ang. Borehole Thermal Energy Storage) na arenie międzynarodowej z powodzeniem są wykorzystywane do magazynowania ciepła. Poniżej opisano wybrane otworowe magazyny ciepła na terenie Europy.

##### 4.1.1.1. Emmaboda, Szwecja

Instalacja w Emmabodzie w Szwecji jest jednym z największych otworowych magazynów ciepła opisanych w literaturze. Od 2010 roku magazynowane jest ciepło odpadowe z czynnej fabryki (Xylem Water Solutions AB), które w przeszłości nie było zagospodarowane. Magazyn planowany był bezpośrednio na terenie fabryki, jednak ze względu na brak wystarczającej przestrzeni, został wykonany w ogrodzie na tej samej działce (Rysunek 22). Większość ciepła generowana jest w fabryce bezpośrednio z pieców do schładzania stopów oraz pośrednio poprzez pobieranie energii z systemu wentylacji i zbiornika wody używanego do chłodzenia (Nordell i in., 2014).

Dla funkcjonowania instalacji wykonano 140 otworów o głębokości 150 m każdy, rozstaw otworów zaplanowano co 4 m (Rysunek 23).

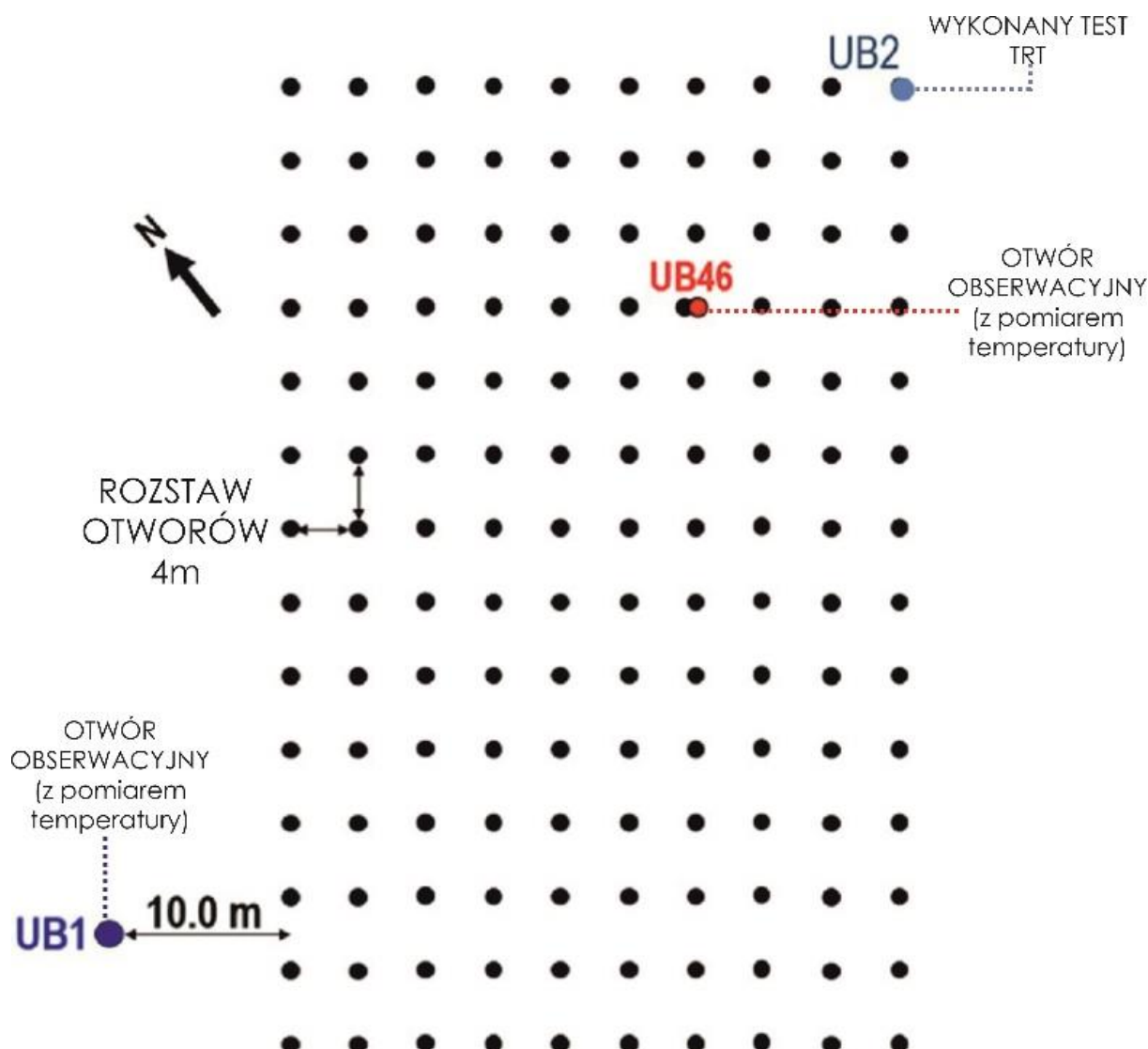


**Rysunek 22 Lokalizacja BTES w w Emmabodzie w Szwecji (Esri Basemap)**

Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 2).

**Tabela 2 Parametry BTES w Emmabodzie w Szwecji**

<b>BTES w Emmabodzie, Szwecja</b>			
<b>Rozpoczęcie eksploatacji</b>	2010	Układ wymienników	Prostokątny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	322 560	Medium akumulujące	Skala (granodioryty)
Liczba otworów	140	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	3
Głębokość otworu [m]	144	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	234
Łączna głębokość otworów [m]	21 000	Izolacja [Tak/Nie]	Tak
Rozstaw otworów [m]	4	Materiał izolacyjny	Szko piankowe (szkło spienione)
Średnica otworów [mm]	115	Grubość izolacji [mm]	400
Rodzaj wymiennika	rura współosiowa	Technologia źródła energii	Ciepło odpadowe
Średnica wymiennika [mm]	40/90	Energia ładowania/rok [MWh]	3271 (planowano 3600)
Materiał wymiennika	PPE	Energia rozładowywania/rok [MWh]	89 (planowano 2700)
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	80	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	45
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	25
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	300	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	rozważone (uwzględnione)



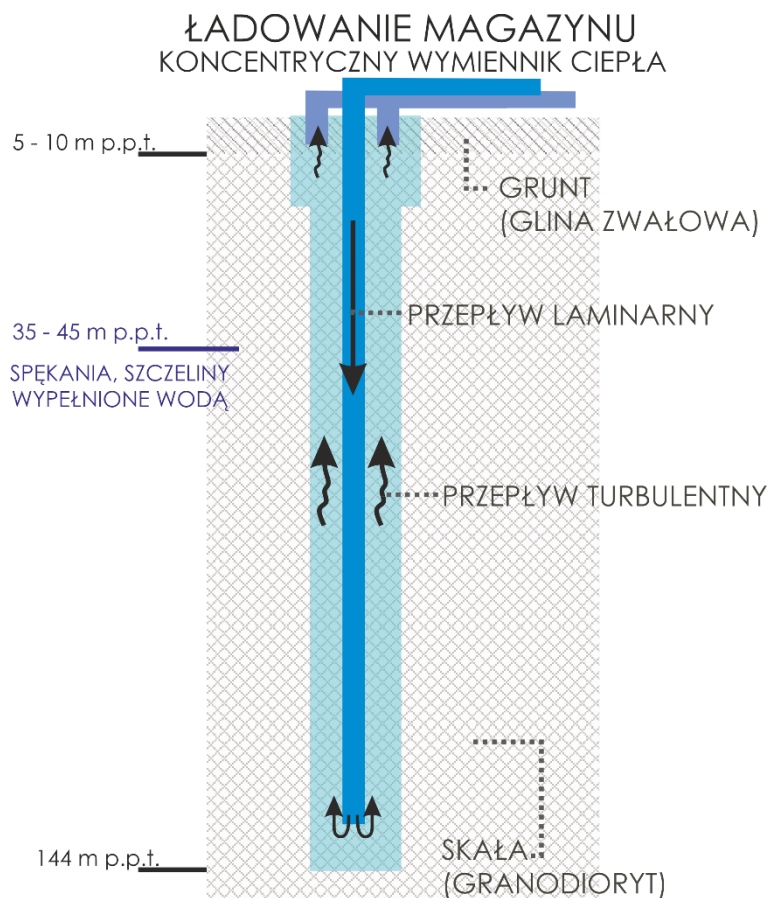
Rysunek 23 Rozstaw otworów w magazynie ciepła w Emmabodzie (Ramstad i in., 2022)

Warunki geologiczne na omawianym terenie są mało zróżnicowane i zostały rozpoznane przez 2 otwory badawcze, wykonane w rozstawie około 50 m. Do głębokości około 5-10 m zalegają gliny zwałowe, poniżej do głębokości 200 m nawiercono skały: w przewadze granodioryty, lokalnie amfibolity i magnetyty. Przez pierwsze 2-3 metry skały są zwietrzałe i spękańce przez co niezbędne było zabezpieczenie otworu do momentu nawiercenia skał niezwiędzających. W dwóch otworach zidentyfikowano szczelinowy poziomy wodonośny na głębokości 35–45 m p.p.t., natomiast w innym otworze – na głębokości 70 m p.p.t. poziomy te charakteryzują się bardzo niską przewodnością hydrauliczną.

Wykonano jeden test reakcji termicznej (TRT) na omawianym obszarze. Uzyskano wynik 3,0 W/(m\*K), który pokrywa się z archiwalnymi wynikami TRT wykonanymi w pobliżu. Średnia temperatura skał przed rozpoczęciem magazynowania energii wynosiła 8°C.

Wymienniki zastosowane w instalacji nie są typowymi U-rurkami, zdecydowano się na wymienniki koncentryczne (Rysunek 24). W tej technologii, czynnik roboczy, którym jest woda, jest w bezpośrednim kontakcie z górotworem. Jeżeli w skałach nie występują spękania, system pracuje jako układ zamknięty. W otworach przechodzących przez spękania, woda zaczyna krążyć w górotworze, dlatego niezbędne jest odpowiednie rozpoznanie lokalizacji (Nordell i in., 2015). Wymienniki koncentryczne pozwalają na uzyskanie korzystnego profilu termicznego w magazynie, jednak w

przypadku magazynu w Emmabodzie były przyczyną różnych problemów technicznych (Andersson i in., 2021).

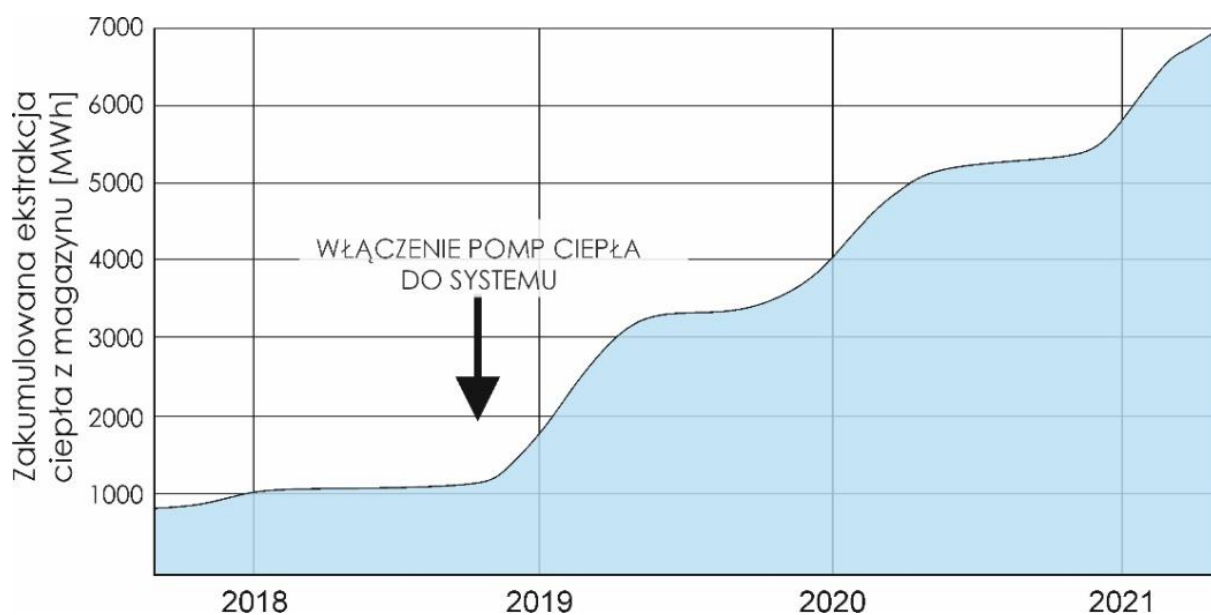


**Rysunek 24 Uproszczony schemat wymiennika koncentrycznego stosowanego w magazynie BTES w Emmabodzie**

Zaprojektowano i wykonano 2 otwory monitoringowe (UB1, UB46) w których za pomocą kabla światłowodowego oraz czujników PT100 jest prowadzony monitoring temperaturowy.

System początkowo nie korzystał z pomp ciepła, gdyż planowana temperatura magazynowania miała być odpowiednio wysoka, aby można było ją ponownie wykorzystać. Niestety, nie udało się osiągnąć takiej wydajności magazynu, pomimo dużej ilości dostępnego ciepła odpadowego temperatura magazynowana nie przekraczała 45°C (magazyn miał wysokie straty ciepła do górotworu). W 2018 roku uruchomiono system pomp ciepła, który znacząco poprawił wydajność magazynu (Rysunek 25) (Andersson i in., 2021).

Aktualnie instalacja spełnia swoją rolę. W literaturze (Nordell, 2015) zwrócono uwagę na zagrożenie korozji rur stalowych oraz na wytrącanie się węglanów i związków żelaza, które w przyszłości mogą stanowić źródło problemów podczas użytkowania. W związku z powyższym zalecono rozważanie obniżenia temperatury magazynowanej energii cieplnej. Finalnie temperaturę pracy magazynu zaniżono do systemu 40/20 °C, dzięki czemu podniosła się również pojemność chłodząca magazynu, zmniejszono straty ciepła oraz zredukowano ryzyko problemów technicznych.



**Rysunek 25** Zmiana wydajności systemu BTES w Emmabodzie po instalacji pomp ciepła. (<https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/default-cb84adc317-8>)

#### 4.1.1.2. Paskov, Czechy

W 2011 r. pod Ostrawą w miejscowości Paskov powstał eksperymentalny - wysokotemperaturowy otworowy magazyn ciepła (HT-BTES, ang. High-Temperature Borehole Thermal Energy Storage). Jest to jedna z pierwszych instalacji na świecie, w której czynnik roboczy osiąga temperatury rzędu 70-90 °C. System magazynuje ciepło odpadowe z pobliskiego układu kogeneracyjnego (CHP, ang. Combined Heat and Power), który do produkcji energii wykorzystuje metan ulatniający się z miejscowej kopalni. Instalacja została zbudowana wewnątrz hali magazynowej firmy Green Gas DPB i w związku ze swoim doświadczalnym charakterem nie została podłączona do sieci ciepłowniczej. Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 3).

**Tabela 3** Parametry BTES w Paskovie w Czechach

BTES w Paskovie (Czechy)			
Rozpoczęcie eksploatacji	2011	Układ wymienników	Cylindryczny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	nie określono	Medium akumulujące	ił/skała
Liczba otworów	16	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,17
Głębokość otworu [m]	60	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,3
Łączna głębokość otworów [m]	960	Izolacja [Tak/Nie]	Nie
Rozstaw otworów [m]	2,5	Materiał izolacyjny	n.d.
Średnica otworów [mm]	120	Grubość izolacji [mm]	n.d.
Rodzaj wymiennika	Podwójna U-rurka	Technologia źródła energii	CHP (kogeneracja)
Średnica wymiennika [mm]	32	Energia ładowania [GJ]	2000
Materiał wymiennika	PE-RT	Energia rozładowywania [GJ]/[MWh]	-
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	nie określono	Temperatura ładowania [°C]	70-97
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	78
Liczba otworów w zespole	2	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	39
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	240	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Nie

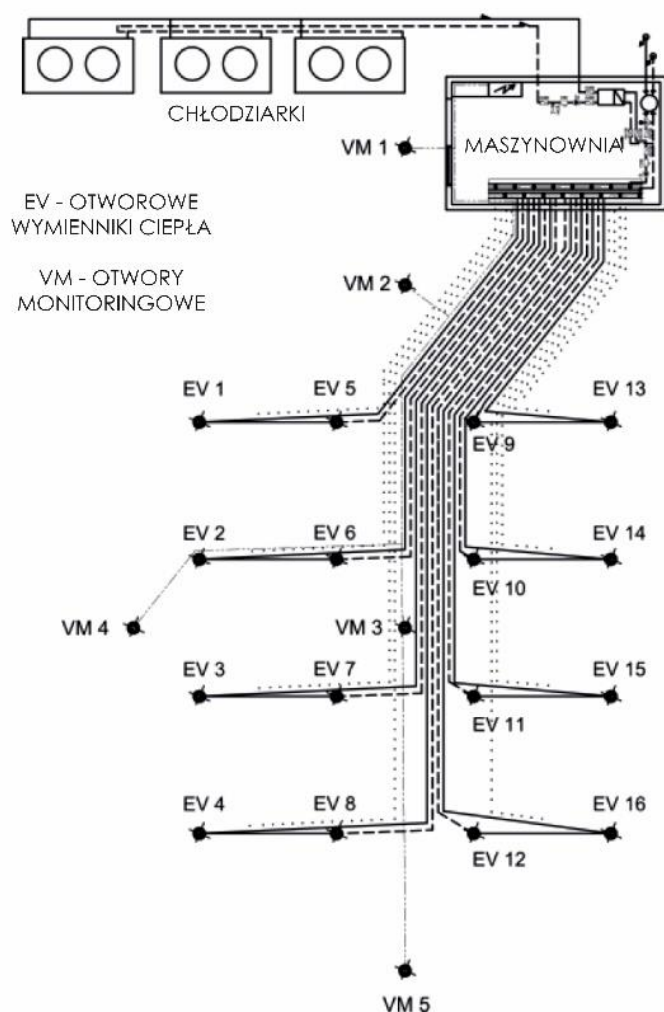
Celem budowy magazynu w Paskovie była ocena zachowania się środowiska skalnego poddanego wysokim temperaturom oraz przetestowanie sprawności całego systemu. Profil litologiczny został dobrze rozpoznany dzięki wierceniom. Do głębokości około 8 m p.p.t. znajdują się utwory czwartorzędowe składające się z ilów, piasków i żwirów – są to utwory tarasu rzeki Ostravice. Poziom wody podziemnej znajduje się na 3 m p.p.t. Poniżej tych osadów, do głębokości 80 m, rozpoznano niezawodnione miocenijskie iłowce z wkładkami pyłowców i piaskowców.

System czerpie ciepło z układu kogeneracyjnego spalającego metan z pobliskiej kopalni. Jest to pożyteczne zagospodarowanie gazu kopalnianego wydobywanego się ze starego wyrobiska, który w przeciwnym razie ulotniłby się do atmosfery.

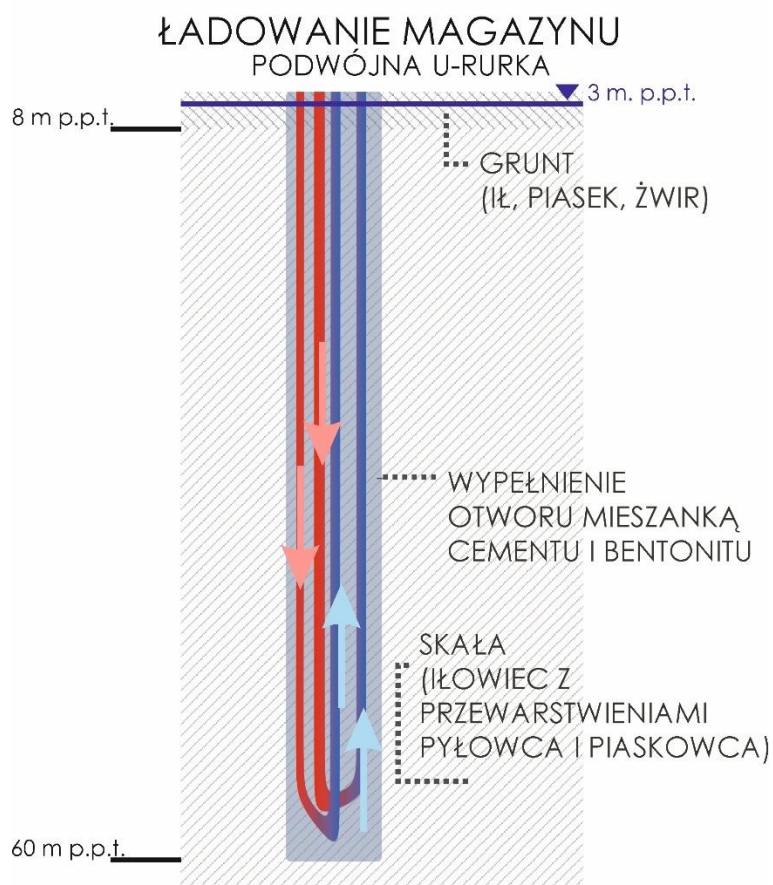
Możliwość ciągłego dostarczania ciepła pozwala na symulowanie różnych stanów pracy układu (ładowanie, magazynowanie, pobieranie).

Magazyn (Rysunek 26) składa się z 16 otworów (EV 1 – EV 16) rozmieszczonych w rozstawie 2,5 m o długości 60 m każdy. Do każdego otworu została wprowadzona podwójna U-rurka (Rysunek 27) z materiału PE-RT, który umożliwia przepływ czynnika roboczego (woda) o temperaturze do 95 °C. Po wprowadzeniu sondy otwór został wypełniony mieszanką cementowo-bentonitową. Dodatkowo zostało wywierconych 6 otworów monitorujących (VM 1 – VM 6) w celu pomiaru temperatury masywu skalnego na różnych głębokościach.

Na terenie magazynu przeprowadzono eksperymentalne badania TRT w 8 otworach. Dzięki bliskiej odległości otworów pozwoliło to na porównanie wyników testu wykonywanego w tych samych warunkach litologicznych. Przeprowadzone badania pozwoliły na uzyskanie wyników przewodności termicznej, oporności termicznej wymiennika oraz rozkładu temperatury (Bujok i in., 2013).



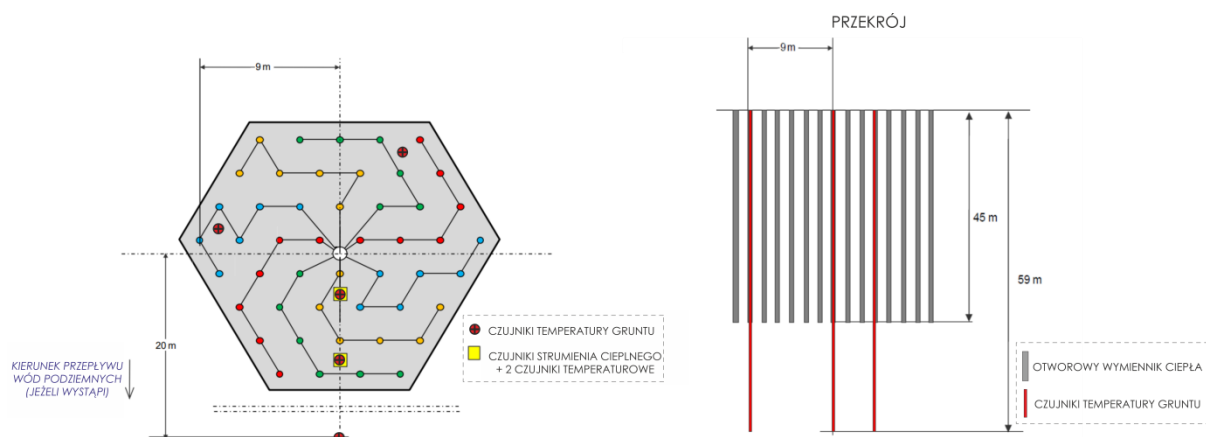
**Rysunek 26 Schemat rozmieszczenia otworowych wymienników ciepła w konstrukcji HT-BTES w Paskowie (widok z góry) (Grycz i in., 2013)**



**Rysunek 27 Uproszczony schemat wymiennika z podwójną U-rurką stosowanego w magazynie BTES w Paskovie**

#### **4.1.1.3. Brædstrup, Dania**

Instalacja w Brædstrup jest najstarszym otworowym magazynem ciepła w Danii. Od 2012 roku magazynowane jest ciepło pochodzące z instalacji fotowoltaicznej/fototermicznej. System jest podłączony do lokalnej sieci ciepłowniczej, gdzie jest wykorzystywany do magazynowania nadmiaru ciepła. Dla funkcjonowania instalacji wykonano 48 otworów o głębokości 45 m każdy, rozstaw otworów zaplanowano co 3 m w układzie trójkątnym. Każdy z 6 otworów jest połączonych szeregowo od zewnątrz do środka instalacji (Rysunek 28). Głębokość otworów została zaprojektowana tak, aby nie ingerowały w warstwę wodonośną, której poziom określono na 50 m p.p.t. Związane jest to z obawą o potencjalne negatywne skutki nagrzewania się warstwy wodonośnej (zgodnie z miejscowym prawem, zabronione jest nagrzewanie wód podziemnych powyżej 20°C) oraz o awarię związaną z rozszczelnieniem się instalacji. We wszystkich otworach zostały wykonane wymienniki ciepła w technologii podwójnej U-rurki o średnicy 32 mm (Rysunek 28).



**Rysunek 28 Rozmieszczenie otworowych wymienników ciepła w magazynie ciepła BTES w Brædstrup (PlanEnergi, 2019)**

Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 4).

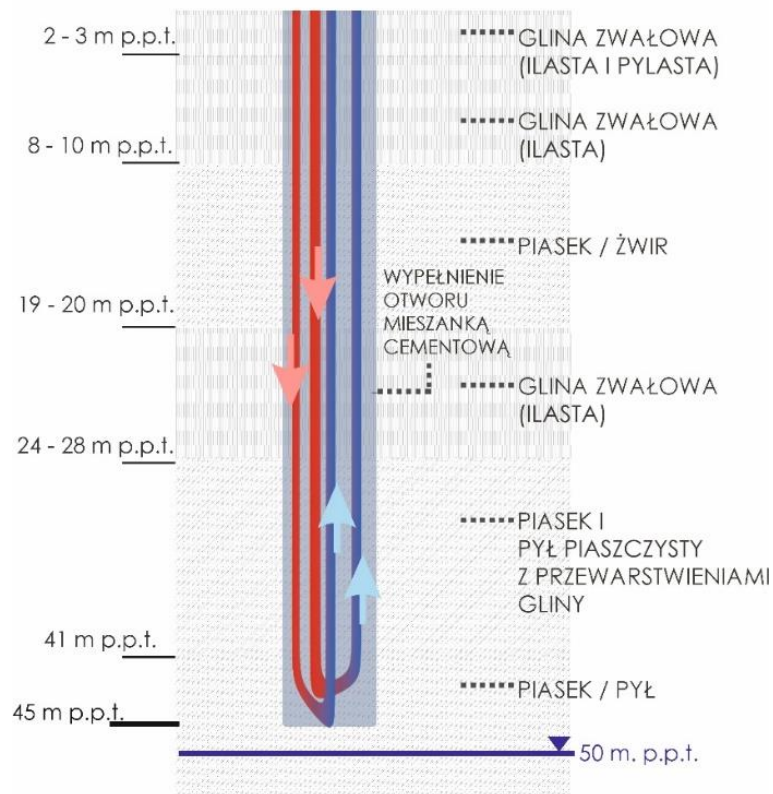
**Tabela 4 Parametry BTES w Brædstrup w Danii**

BTES w Brædstrup, Dania			
Rozpoczęcie eksploatacji	2012	Układ wymienników	Cylindryczny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	19 000	Medium akumulujące	H
Liczba otworów	48	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	1,42
Głębokość otworu [m]	45	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	1,9
Łączna głębokość otworów [m]	2 160	Izolacja [Tak/Nie]	Tak
Rozstaw otworów [m]	3	Materiał izolacyjny	muszle małży
Średnica otworów [mm]	150	Grubość izolacji [mm]	500
Rodzaj wymiennika	Podwójna U-rurka	Technologia źródła energii	instalacja fototermiczna/fotowoltaiczna
Średnica wymiennika [mm]	32	Energia ładowania [MWh]	444
Materiał wymiennika	RAUGEOPEX	Energia rozładowywania [MWh]	163
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	95	Temperatura ładowania [°C]	80
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	60
Liczba otworów w zespole	6	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	20
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	540	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak

W celu monitorowania temperatury na obszarze instalacji BTES oraz otaczających ją warstw geologicznych oraz poziomów wodonośnych zainstalowano 100 czujników w 5 otworach monitoringowych, cztery z nich znajdują się na terenie BTES, jeden w odległości około 11 m od instalacji.

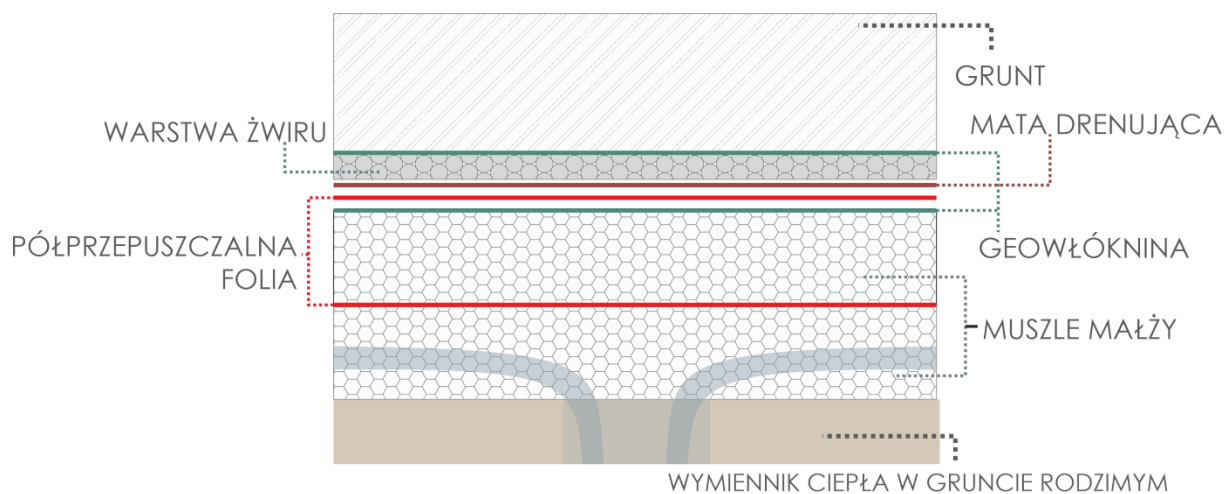
Odwierty na terenie magazynu pozwoliły na dokładne rozpoznanie litologii lokalizacji. Profil składa się z glin zwałowych (ilastych i pylastych), naprzemiennie z piaskami, żwirami, pyłem piaszczystym i pyłem (Rysunek 29). Grunty spoiste oceniono na korzystne do magazynowania energii cieplnej. Grunty sypkie uznano za mniej korzystne, ze względu na niską przewodność termiczną (PlanEnergi, 2019).

## ŁADOWANIE MAGAZYNU PODWÓJNA U-RURKA



**Rysunek 29** Uproszczony schemat wymiennika z podwójną U-rurką stosowanego w magazynie BTES w Brødstrup

Ciekawym rozwiązaniem zastosowanym w Brødstrup jest izolacja nad wymiennikami ciepła, zbudowana głównie z muszli małży (Rysunek 30). Materiał został dobrany ze względu na niską przewodność termiczną.



**Rysunek 30** Konstrukcja izolacji termicznej w magazynie BTES w Brødstrup (PlanEnergi, 2019)

Wdrożenie magazynu przyczyniło się do zmniejszenia zużycia gazu ziemnego i spadku cen ciepła, Brødstrup DH jest jedną z 25% najtańszych elektrowni ciepłowniczych (Rysunek 31) w Danii (Jensen i in., 2016).

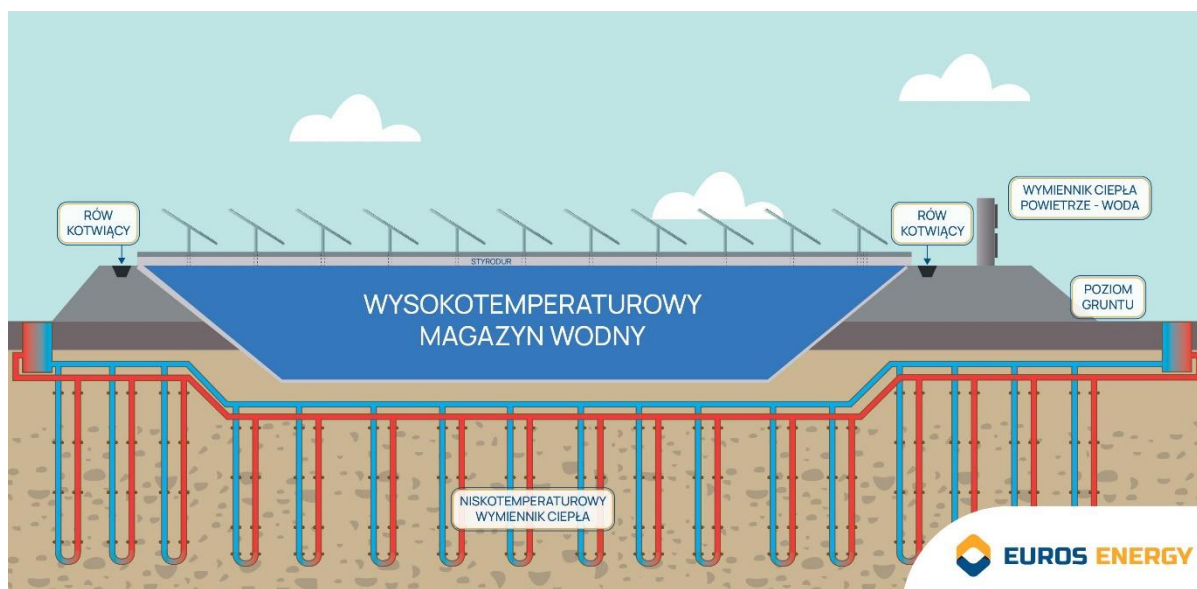


Rysunek 31 Schemat systemu ciepłowniczego w Brædstrup (Hahn (red.), 2019)

#### 4.1.2. Wybrane doświadczenia krajowe

##### 4.1.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości

Instalacja w Lidzbarku Warmińskim łączy trzy technologie podziemnego magazynowania ciepła. Jest to jedyna instalacja na świecie gdzie magazyn BTES znajduje się bezpośrednio pod magazynem typu PTES (Rysunek 32). Ciepłownia posiada także podziemny bufor typu TTES, który działa w formie krótkoterminowego magazynu.

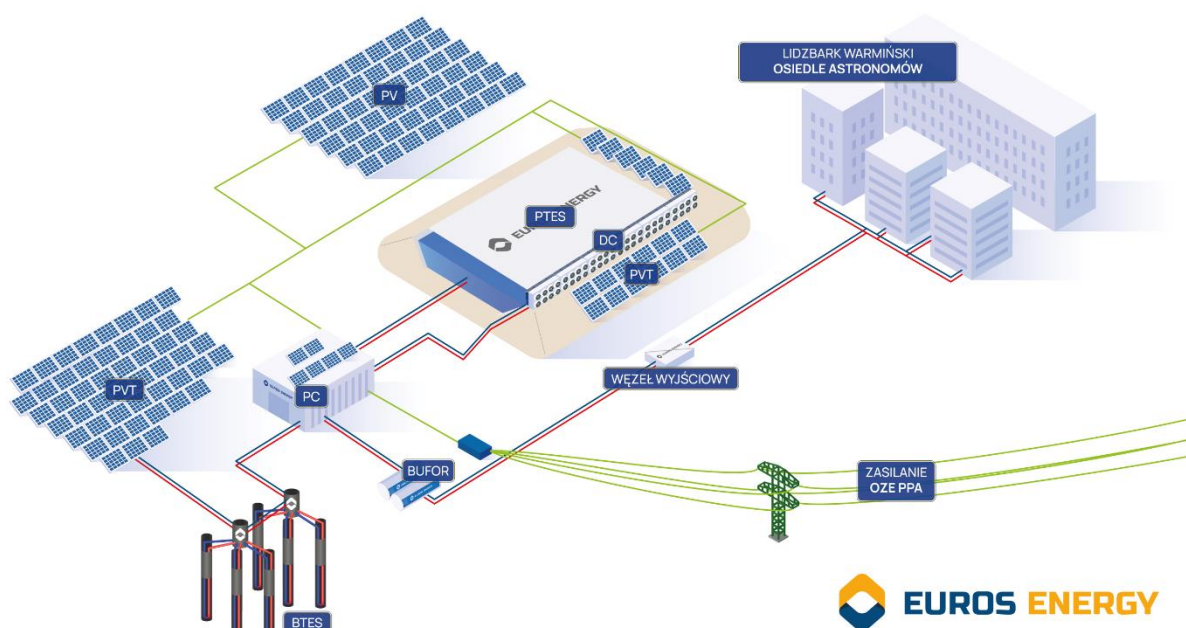


Rysunek 32 Warstwowe ułożenie komponentów Demonstratora Technologii pozwala na zmniejszenie zajętości terenu (materiały własne Euros Energy)

Ciepłownia Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim to działający Demonstrator Technologii zeroemisyjnej transformacji ciepłownictwa powiatowego łączący pracę pomp ciepła z sezonowymi magazynami ciepła BTES i PTES, przy czym obecnie jest to jedyny magazyn PTES wybudowany w Polsce. Projekt został zrealizowany w ramach przedsięwzięcia-konkursu „Ciepłownia Przyszłości,

czyli system ciepłowniczy z OZE” ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR). Zwycięski projekt firmy Euros Energy uzyskał pełne finansowanie z Funduszy Unijnych na budowę pełnoskalowego demonstratora. Dysponentem sieci ciepłowniczej zasilanej z instalacji jest firma Veolia Północ.

Praca Ciepłowni Przyszłości opiera się na zintegrowanej pracy pomp ciepła z trzema dolnymi źródłami: z powietrznymi wymiennikami ciepła (Dry-cooler), z niskotemperaturowym magazynem gruntowym (BTES) oraz z wysokotemperaturowym magazynem wodnym (PTES). Pompy ciepła zasilane są energią elektryczną produkowaną z hybrydowych kolektorów słonecznych PVT oraz bezpośrednio z pobliskiej instalacji fotowoltaicznej Koniewo. W zimowe noce system wspierany jest energią elektryczną dostarczaną z Krajowej Sieci Elektroenergetycznej w całości zakupioną z gwarancją pochodzenia z odnawialnych źródeł energii w ramach kontraktów typu Power Purchase Agreement (PPA) (Rysunek 33). Magazyny sezonowe ładowane są latem ciepłem wyprodukowanym przez pompy ciepła, dla których dolnym źródłem ciepła jest powietrzny wymiennik ciepła, przy wykorzystaniu energii elektrycznej pochodzącej wyłącznie z lokalnych instalacji PV i PVT. Ciepłownia Przyszłości dostarcza ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania i przygotowywania ciepłej wody użytkowej do większości budynków Osiedla Astronomów w Lidzbarku Warmińskim. Całkowita powierzchnia użytkowa lokali mieszkalnych zasilanych Demonstratorem Technologii wynosi 28 262 m<sup>2</sup>. Wszystkie lokale mieszkalne są ogrzewane. Ciepła woda użytkowa jest dostarczana do lokali o łącznej powierzchni: 25 730 m<sup>2</sup>.

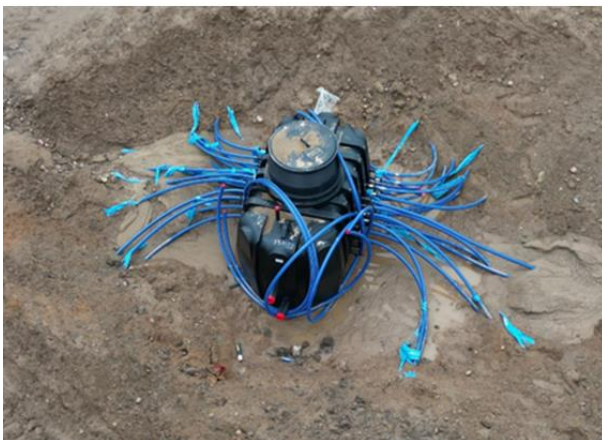


**Rysunek 33 Schemat koncepcyjny Ciepłowni Przyszłości (materiały własne Euros Energy)**

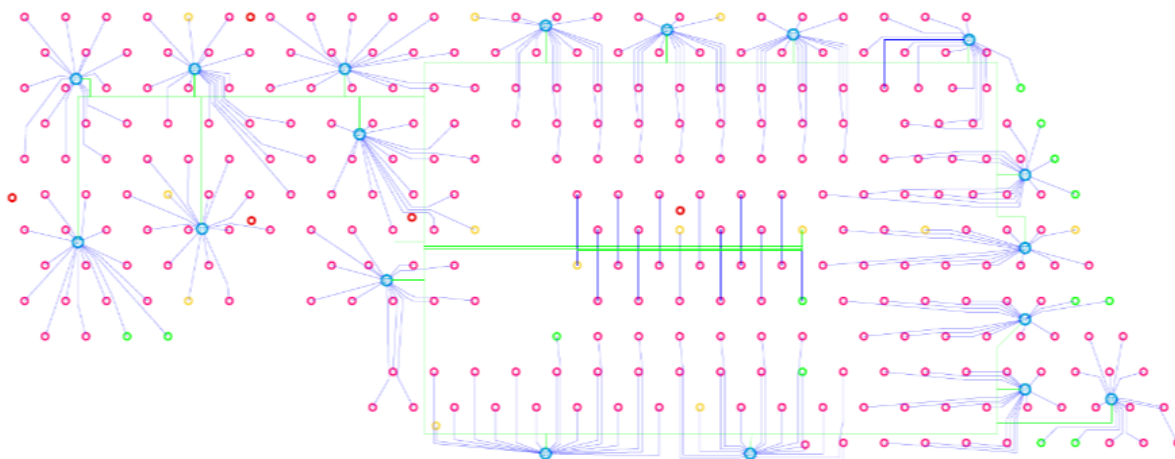
Otworowy magazyn ciepła odróżnia się od typowej instalacji BTES niższą temperaturą magazynowanego ciepła – w Ciepłowni Przyszłości wynosi ona 5-25 °C. Magazyn składa się z 297 wymienników pionowych o długości 99,9 metrów każdy. Wymienniki te są rozłożone w układzie siatki trójkątnej w odległości 5 metrów. Jako wymienniki pionowe zastosowano sondy geotermalne o wymiarze standardowym 2x40 mm. Przewody sondy wykonane są z polietylenu wysokiej gęstości HDPE 100 RC. Przepływa przez nie mieszanina wody i glikolu propylenowego transportując tym samym ciepło do i z gruntu. Magazyn zajmuje całą powierzchnię terenu objętą nową inwestycją (Rysunek 34, Rysunek 35, Rysunek 36).



**Rysunek 34 Widok z lotu ptaka na instalację Ciepłownia Przyszłości. Po lewej stronie widoczny magazyn PTES. Magazyn BTES zajmuje całą powierzchnię działki instalacji (Euros Energy)**



**Rysunek 35 Budowa magazynu BTES - montaż studzienek rozdzielczych i połączeń poziomych (Euros Energy)**



**Rysunek 36 Rozmieszczenie odwiertów geotermalnych, połączeń poziomych oraz studni rozdzielaczowych gruntowego magazynu ciepła (Euros Energy)**

Parametry BTES Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim przedstawiono w tabeli (Tabela 5).

**Tabela 5 Parametry BTES w Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmiński**

BTES w Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim, Polska			
Rozpoczęcie eksploatacji	2024	Układ wymienników	Siatka trójkątna
Objętość [m <sup>3</sup> ]	640 000	Medium akumulujące	Gliny i ropy
Liczba otworów	300	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,00
Głębokość otworu [m]	99,9	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,340
Łączna głębokość otworów [m]	Ok. 30 000	Izolacja [Tak/Nie]	Tak
Rozstaw otworów [m]	5	Materiał izolacyjny	Magazyn PTES
Średnica otworów [mm]	150	Grubość izolacji [mm]	Magazyn PTES
Rodzaj wymiennika	U-rura	Technologia źródła energii	Pompy ciepła/PVT
Średnica wymiennika [mm]	40	Energia ładowania/rok [MWh]	2300
Materiał wymiennika	HDPE	Energia rozładowywania/rok [MWh]	1500
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	40	Temperatura ładowania [°C]	20
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	15
Liczba otworów w zespole	16	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	5
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	300	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak

Wysokotemperaturowy magazyn wodny to szczelny izolowany basen z obwałowaniem ziemnym o pojemności 15 tys. m<sup>3</sup> i temperaturze pracy od 7°C do nawet 70°C. Dzięki relatywnie wysokim temperaturom w magazynie wodnym pompy ciepła pracują przy wysokich parametrach współczynnika wydajności grzewczej COP. Dzięki temu wodny magazyn ciepła jest najczęściej wykorzystywany zimą w warunkach niskich temperatur zewnętrznych, niewielkiej produkcji energii elektrycznej z instalacji PV i PVT oraz wyższych wymaganych temperatur zasilania sieci ciepłowniczej.

Szczelność zbiornika gwarantuje wykonanie powłoki szczelnej z geomembrany HDPE. Na powierzchni zbiornika zaprojektowano pokrywą pływającą zbudowaną z warstw geomembran i izolacji termicznej. Górna warstwa izolacji termicznej przykryta geomembraną HDPE ułożona w spadkach, umożliwić będzie odprowadzenie wód opadowych na zewnątrz zbiornika (Rysunek 37, Rysunek 38, Rysunek 39).



**Rysunek 37 Magazyn PTES podczas budowy (Euros Energy)**



**Rysunek 38 Napelnianie wodą z sieci wodociągowej (Euros Energy)**



**Rysunek 39 Wykańczanie i zabezpieczanie wałów basenu (Euros Energy)**

Zbiornik wykonano częściowo poniżej poziomu terenu w wykopie oraz powyżej z zastosowaniem grobli ze skarpami o nachyleniu 1:1,5. Poziom dna wyznaczono na rzędnej 89,22 m n.p.m. Wysokość względna lustra wody zbiornika wynosi 8,13 m. Zbiornik w rzucie ma kształt zbliżony do prostokąta o wymiarach w poziomie podstawy grobli: 87,09; 87,19; 62,74 i 61,11 m.

Podłoże pod dnem zbiornika stanowią grunty rodzime spoiste w postaci piasków gliniastych, glin piaszczystych i pyłów oraz grunty niespoiste w postaci piasków średnich oraz pospółek. Nie stwierdzono występowania swobodnego zwierciadła wody podziemnej w poziomie dna zbiornika oraz w gruntach niespoistych powyżej dna zbiornika. Z powierzchni dna wykopu wykonanego należy wykonać badania odbiorowe potwierdzające zgodność warunków gruntowych z założeniami projektowymi.

Parametry PTES Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim przedstawiono w tabeli (Tabela 6).

**Tabela 6 Parametry PTES w Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim, Polska**

PTES w Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	15 000	Wysokość zbiornika [m]	10
Powierzchnia pokrywy [m <sup>2</sup> ]	3000	Wymiary pokrywy [m]	60/50
Izolacja [Tak/Nie]	Tak	Maksymalny kąt nachylenia skarp zbiornika [°]	35
Materiały izolacyjne	HDPE (high density polyethylene), styrodur	Medium akumulujące	Woda
Technologia źródła energii	Pompy ciepła	Efektywna pojemność cieplna	1000 MWh <sub>th</sub>
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	67
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	7
Grubość izolacji [cm]	dno: 50, ściany: 50, pokrywa: 100		

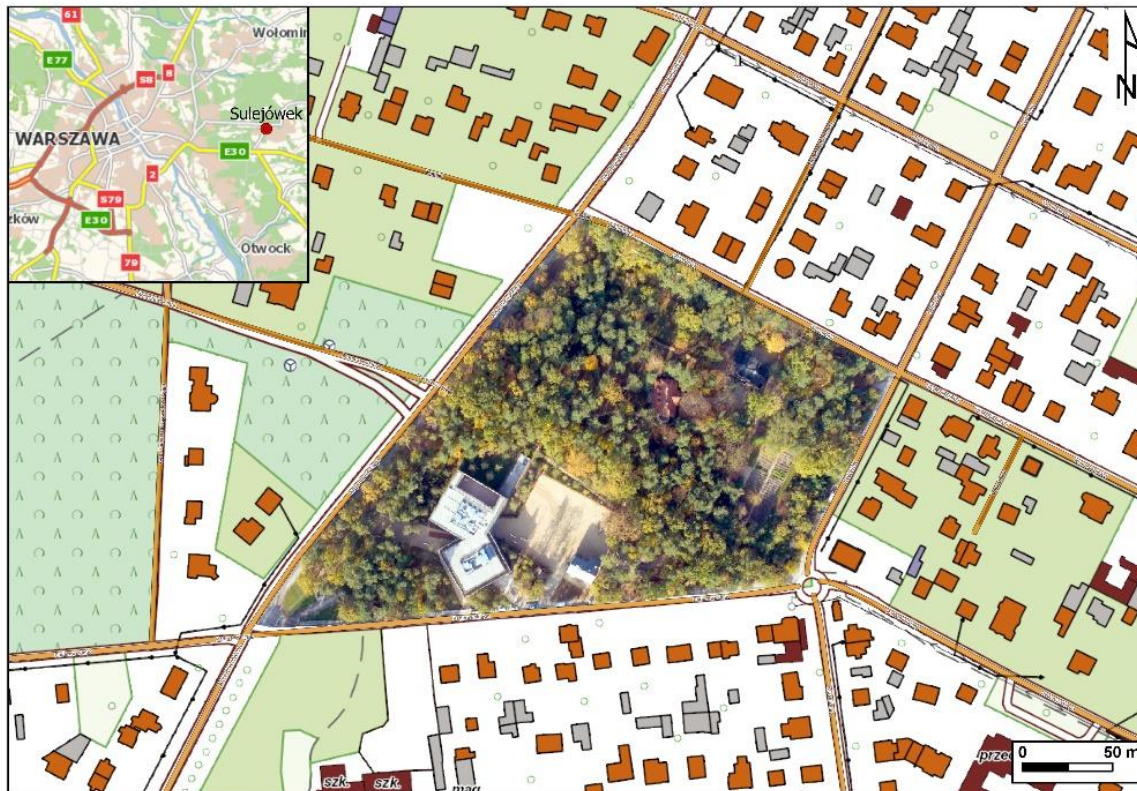
Trzeci poziom magazynowania ciepła w formie krótkoterminowego magazynu TTES, pracującego jako bufor dla sieci ciepłowniczej, ma pojemność 100 m<sup>3</sup> i zbudowany jest z dwóch zbiorników stalowych o pojemności 50 m<sup>3</sup> każdy, zaizolowanych i zakopanych w gruncie (Rysunek 40). Zakres temperaturowy pracy wynosi od 60°C do 85°C. Jego celem jest maksymalizacja autokonsumpcji energii elektrycznej wyprodukowanej lokalnie w panelach PV i kolektorach PVT.



**Rysunek 40 Bufor sieci ciepłowniczej - magazyn krótkoterminowy – przed zasypaniem (Euros Energy)**

#### **4.1.2.2. Sulejówkę – Muzeum Marszałka Józefa Piłsudskiego**

Muzeum Marszałka Józefa Piłsudskiego to obiekt użyteczności publicznej wybudowany w 2019 roku o powierzchni ponad 15 000 m<sup>2</sup> (Rysunek 41).



**Rysunek 41 Lokalizacja Muzeum Marszałka Józefa Piłsudskiego (<https://mapy.geoportal.gov.pl/>)**

Co istotne znaczna część powierzchni użytkowej budynku zlokalizowana jest na czterech kondygnacjach podziemnych. Obiekt jest w całości ogrzewany i klimatyzowany z instalacji pomp ciepła współpracujących z magazynem ciepła BTES. Całkowita moc grzewcza wymagana przez instalacje wewnętrzne i zapewniana przez maszynownię pomp ciepła wynosi 500 kW, zaś całkowita moc chłodnicza to 613 kW.

Maszynownia grzewczo – chłodnicza pracuje w oparciu o kaskadę pomp ciepła EUROS GEO PRO. Maszynownia odpowiada za przygotowanie ciepła i chłodu na potrzeby centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej, osuszania powietrza oraz produkcji wody lodowej. Dodatkowo w układzie znajduje się instalacja tzw. free-cooling, która schładza czynnik roboczy poprzez przetłaczanie go przez gruntowe wymienniki ciepła. Proces ten korzysta z właściwości termicznych gruntu, który na pewnej głębokości utrzymuje stałą temperaturę równą ok. 10°C niezależnie od pory roku czy warunków atmosferycznych. Free-cooling charakteryzuje się niezwykle wysoką efektywnością energetyczną, gdyż jedyna energia zużywana podczas pracy instalacji to ta potrzebna do zasilania pomp obiegowych. W praktyce oznacza to, że uzyskana moc chłodnicza jest kilkanaście razy większa niż poniesiony koszt energetyczny.

Każda pompa ciepła wyposażona jest we własną automatykę sterującą pracą urządzenia. Sterowniki te zarządzają pracą urządzenia oraz czuwają nad właściwymi parametrami pracy. Elementem nadrzędnym jest sterownik, który decyduje o załączaniu kolejnych jednostek zasilających, zajmuje się obsługą błędów urządzeń oraz umożliwia komunikację z pozostałymi instalacjami. W przypadku awarii pompy ciepła, jej miejsce w kaskadzie natychmiast zajmuje kolejna jednostka, dzięki czemu uszkodzenie jednego urządzenia nie wpływa w istotny sposób na działanie instalacji – ograniczana jest jedynie dostępna moc szczytowa.

Decyzja o zastosowaniu chłodzenia pasywnego bądź aktywnego jest dokonywana na podstawie temperatury dolnego źródła ciepła i jej porównaniu z temperaturą zadaną zasilania wyznaczoną z krzywej chłodniczej. Temperatury dolnego źródła są stabilne w krótkich okresach. Można zatem oczekiwać, że jeśli temperatura dolnego źródła jest wystarczająco niska aby załączyć chłodzenie pasywne, źródło nie ulegnie przegrzaniu w ciągu kilku – kilkunastu godzin.

Dolne źródło pompy ciepła składa się ze 106 odwiertów o głębokości 100 m każdy (Rysunek 42, Rysunek 43).



**Rysunek 42 Rozstaw odwiertów w magazynie ciepła BTES w instalacji w Sulejówku (Euros Energy)**



**Rysunek 43 Zdjęcia z budowy magazynu BTES w Sulejówku (Euros Energy)**

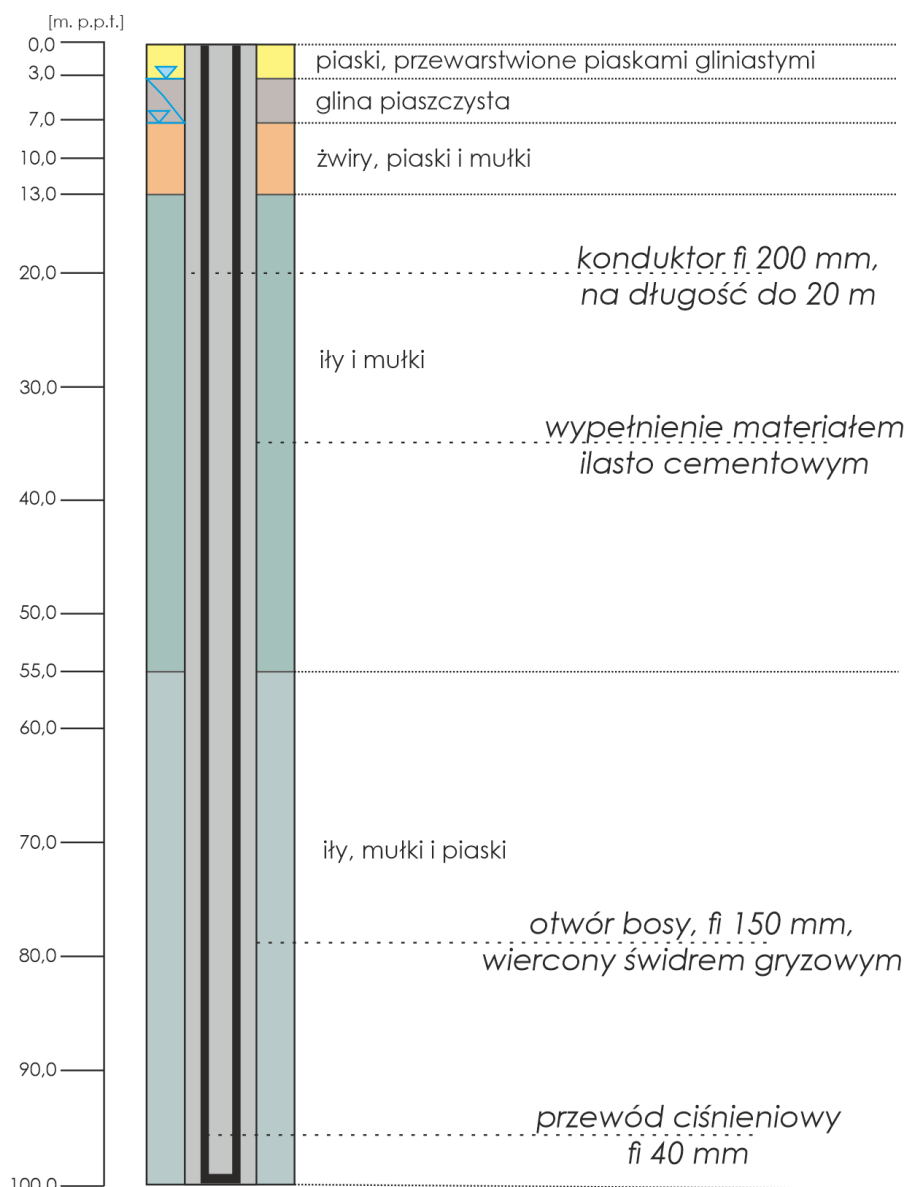
Wykonano osiem studni rozdzielczych połączonych z pomieszczeniem centrali grzewczo-chłodniczej rurami HDPE PE100 PN16 o średnicy 90 mm. Studnie wyposażone w rozdzielacze z zaworami odcinającymi na przewodach zasilających oraz zaworami odcinającymi na przewodach powrotnych. Między odwiertami a studniami rozdzielczymi wykonano połączenia z rur HDPE PN16 o średnicy 40 mm. W odwierty wpuszczano 2 rury HDPE PN16 o średnicy 40 mm połączone na końcu U-kształtką zintegrowaną z głowicą DWD (sondy gruntowe).

Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 7).

**Tabela 7 Parametry BTES w Sulejówku, Polska**

BTES w Sulejówku w Muzeum Marszałka Józefa Piłsudskiego			
Rozpoczęcie eksploatacji	2020	Układ wymienników	Nieregularny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	150 000	Medium akumulujące	Gliny, ropy, mułki, piaski, żwiry
Liczba otworów	106	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,50
Głębokość otworu [m]	99,0	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,340
Łączna głębokość otworów [m]	Ok. 10 600	Izolacja [Tak/Nie]	Nie
Rozstaw otworów [m]	6	Technologia źródła energii	Górotwór, ciepło odpadowe
Srednica otworów [mm]	150	Liczba otworów w zespole	Ok. 10
Rodzaj wymiennika	U-rura	Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	300
Srednica wymiennika [mm]	40	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	40
Materiał wymiennika	HDPE	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	20
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	20	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie		

Analizowany teren leży w obrębie niecki warszawskiej, w jej południowo-wschodniej części. W okolicy zrealizowanych prac, miąższość utworów czwartorzędowych może dochodzić do ok. 55 m. W ich skład wchodzi utworów piaszczyste – o miąższości dochodzącej do ok. 9 m z glinami zwałowymi w interwale głębokości od 3 do 7 m p.p.t. Poniżej występują ropy i mułki zastoiskowe (Rysunek 44).

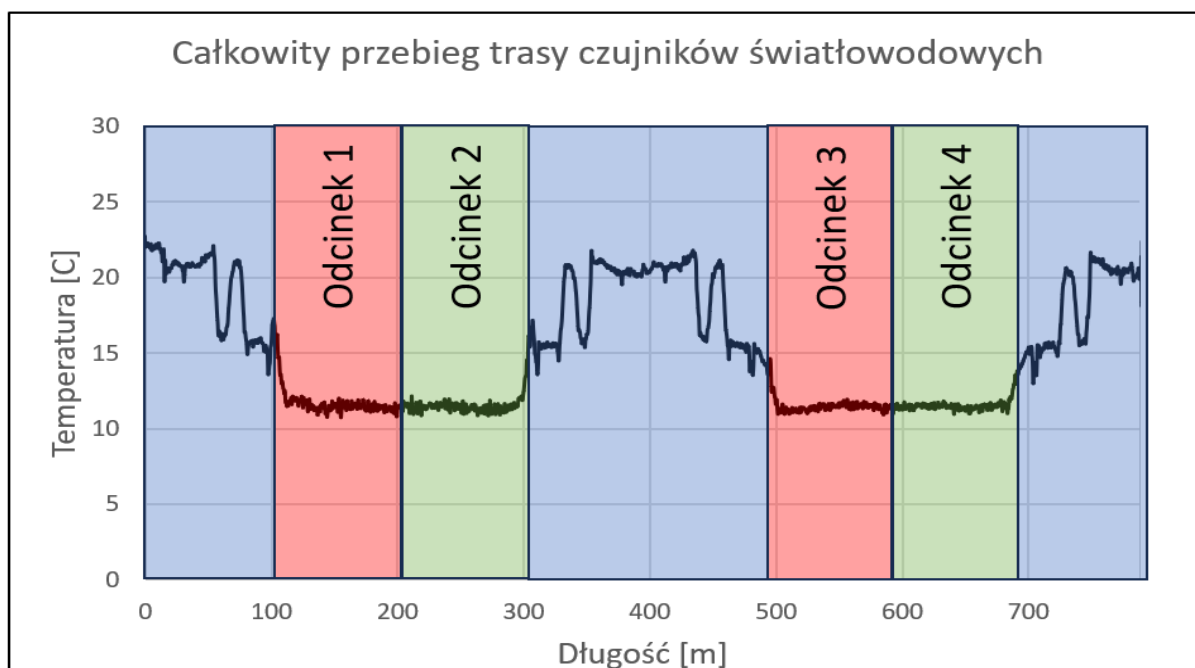


**Rysunek 44 Schemat profilu geologicznego w Sulejówku**



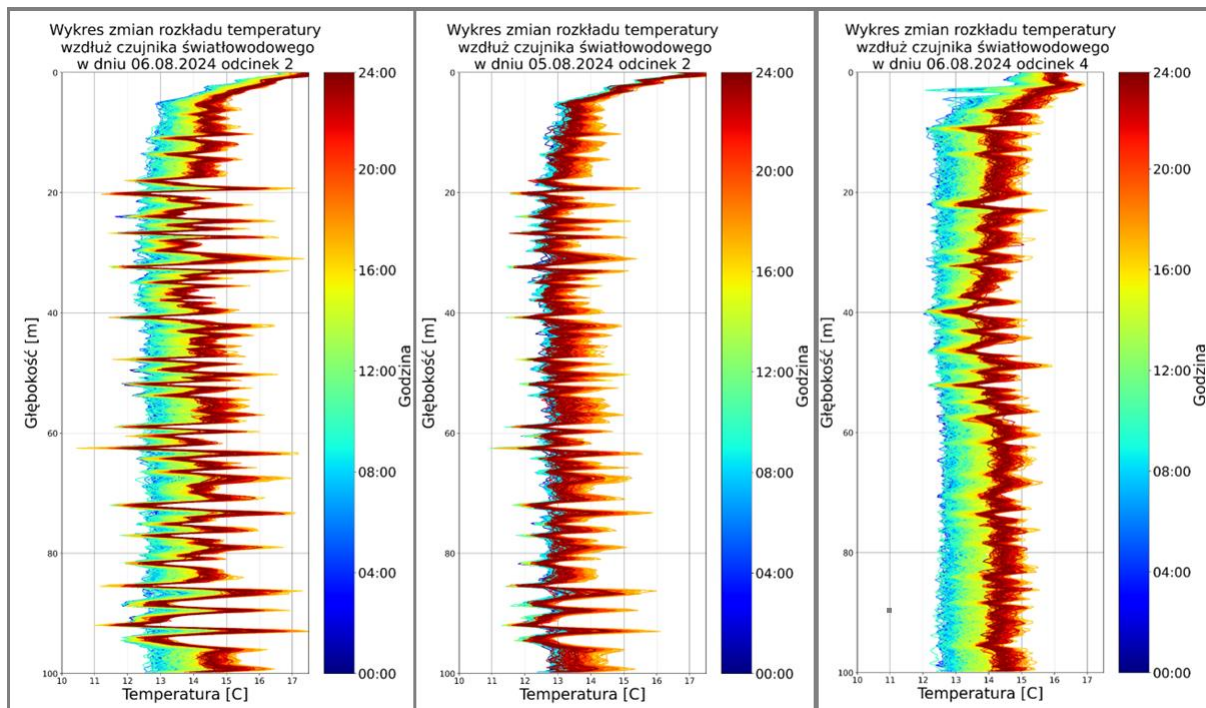
**Rysunek 45 Montaż instalacji DTS w Sulejówku (Euros Energy)**

Na system światłowodowy do pomiarów DTS składają się dwa kable sensoryczne o łącznej długości wynoszącej około 800 m. Światłowody zostały zespawane w jedną trasę, aby umożliwić jednoczesny pomiar za pomocą urządzenia z jednym kanałem optycznym. Trasa czujnika składa się z trzech odcinków niepomiarowych (odcinki doprowadzenia światłowodu do maszynowni oraz pomiędzy odwiertami) oraz z czterech stref pomiarowych o długości ok. 100 m (Rysunek 46). Strefy pomiarowe odnoszą się do części światłowodu, które znajdują się w kolektorze gruntowym. Część światłowodu pomiędzy strefą czerwoną i zieloną odzwierciedla w trasie czujnika pętlę na końcu kolektora gruntowego.



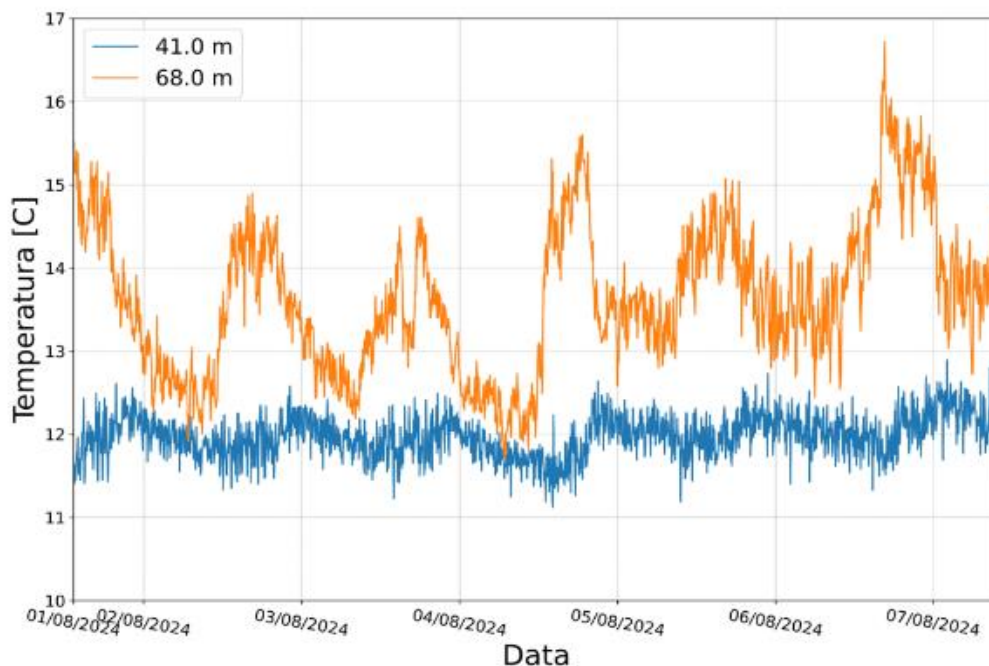
**Rysunek 46 Schematyczny wykres trasy światłowodowej z podziałem na odcinki pomiarowe (Euros Energy)**

W ramach rejestrowania rozkładu temperatury wzdłuż długości kabla sensorycznego, w systemie pomp ciepła, zastosowano rejestrator optyczny wykorzystujący zjawisko rozpraszania Ramana. Parametry pomiarów DTS: Rozdzielczość przestrzenna: 0.5 m, interwał próbkowania: 0.25 m, czas pomiaru: 1 min, częstotliwość pomiaru: 1 min, łączny czas pomiarów: około 140 h (Rysunek 47, Rysunek 48).



**Rysunek 47** Przykładowe wyniki ilustrujące rozkład temperatur wzdłuż głębokości odwiertów (Euros Energy)

#### Zmiana temperatury w wybranych przekrojach w trakcie badania DTS odcinek 2



**Rysunek 48** Przykładowe wyniki ilustrujące rozkład temperatur w czasie dla różnych głębokości odwiertów (Euros Energy)

#### 4.1.2.3. Zwoleń – budynek wielorodzinny

Inwestycja w Zwoleniu zrealizowana w budynku wielorodzinnym o powierzchni 3500 m<sup>2</sup> na ulicy Bogusza 9/11 w Zwoleniu z roku 1989 jest przykładem całościowego podejścia do głębokiej termomodernizacji dla fali renowacji budynków wielorodzinnych (Rysunek 49). Dotyczy to w szczególności budynków z lat 70 i 80 ubiegłego wieku.



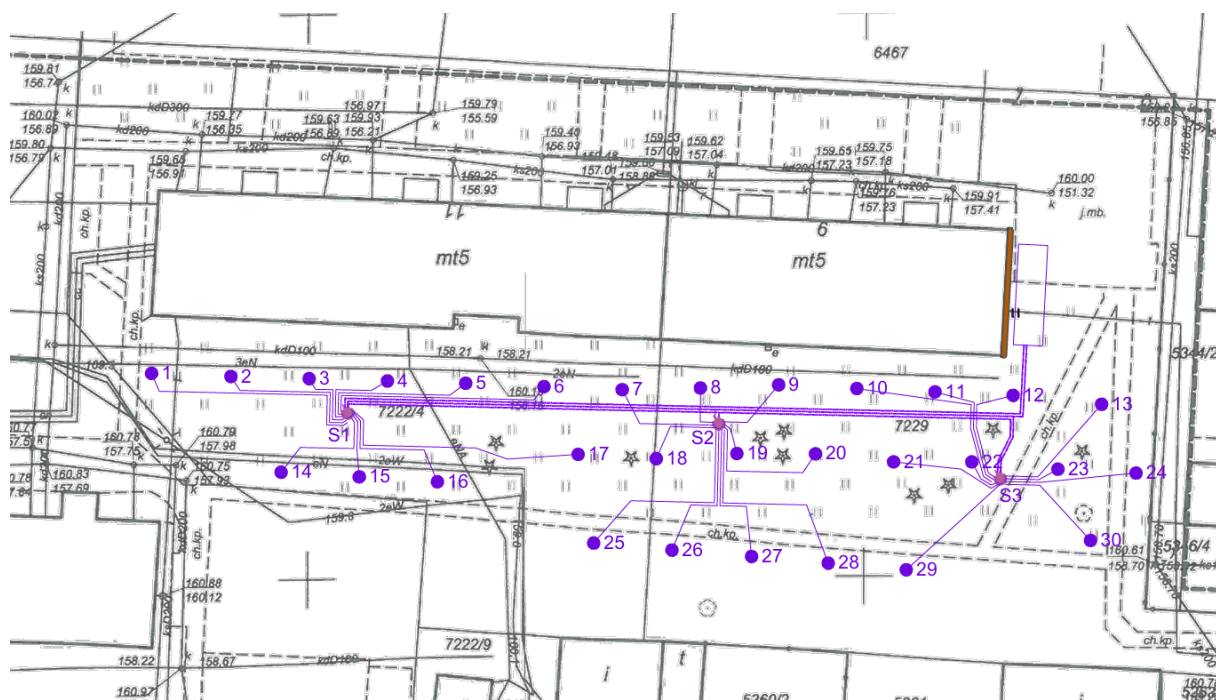
**Rysunek 49 Budynek wielorodzinny na ulicy Bogusza 9/11 w Zwoleniu (Euros Energy)**

Inwestycję zasila nowe źródło ciepła i chłodu bazujące na trzech wydajnych pompach ciepła typu solanka/woda o mocy nominalnej 54 kW oraz wysokotemperaturowej pompie ciepła dedykowanej dla przygotowania ciepłej wody użytkowej o mocy 18 kW. Takie rozwiązanie wpisuje się w trend elektryfikacji sektora ogrzewnictwa wielorodzinnego. Całość instalacji źródła grzewczo-chłodniczego zamieszczono w prefabrykowanym kontenerze „Doku energetycznym dla budynku wielorodzinnego”, co zasadniczo skróciło proces wymiany. Pompy ciepła współpracują z gruntowym magazynem ciepła BTES w formie 30 pionowych otworowych wymienników ciepła o głębokości 99,5 m zainstalowanym obok budynku (Rysunek 50).

Wybrane rozwiązania techniczne, czyli pompy ciepła wraz z gruntowym magazynem ciepła, buforem oraz autorskimi algorytmami doboru i sterowania, pozwalają na maksymalną autokonsumpcję energii elektrycznej produkowanej w lokalnie ogniwach fotowoltaicznych o mocy 80 kW zainstalowanych na wzmocnionym dachu budynku.

Rozwiązanie uzupełnia nowa, niskotemperaturowa instalacja odbiorcza w mieszkaniach, czyli płaskie klimakonwektory ścienne zastępujące istniejące grzejniki wysokotemperaturowe. W efekcie pompy ciepła mają idealne parametry tak do ogrzewania jak i do chłodzenia mieszkań zaś system oferuje mieszkańcom pełen komfort termiczny. Instalacja zapewnia możliwość pasywnego (tzw. free-

cooling), jak również aktywnego chłodzenia, co umożliwi ekonomiczną produkcję chłodu. Korelacja zapotrzebowania na chłód z wysoką produkcją modułów fotowoltaicznych pozwala na udostępnienie mieszkańcom bezpłatnej klimatyzacji, zaś odpadowe ciepło ładuje magazyn BTES.



**Rysunek 50 Rozstaw otworów w magazynie energii ciepłej w Zwoleniu, ul. Bogusza 9/11 (Euros Energy)**

Efektywność energetyczną zwiększa także dodatkowa izolacja dla instalacji dystrybucji ciepłej wody użytkowej. Projekt dopełnia ocieplenie stropodachu, sufitów piwnic oraz ścian. Zastosowanie efektywniejszego styropianu grafitowego nie zaburza wnek okiennych a całość dopełnia nowa estetyczna elewacja – nawiązująca do „wielkich płyt” z których zbudowany jest budynek.

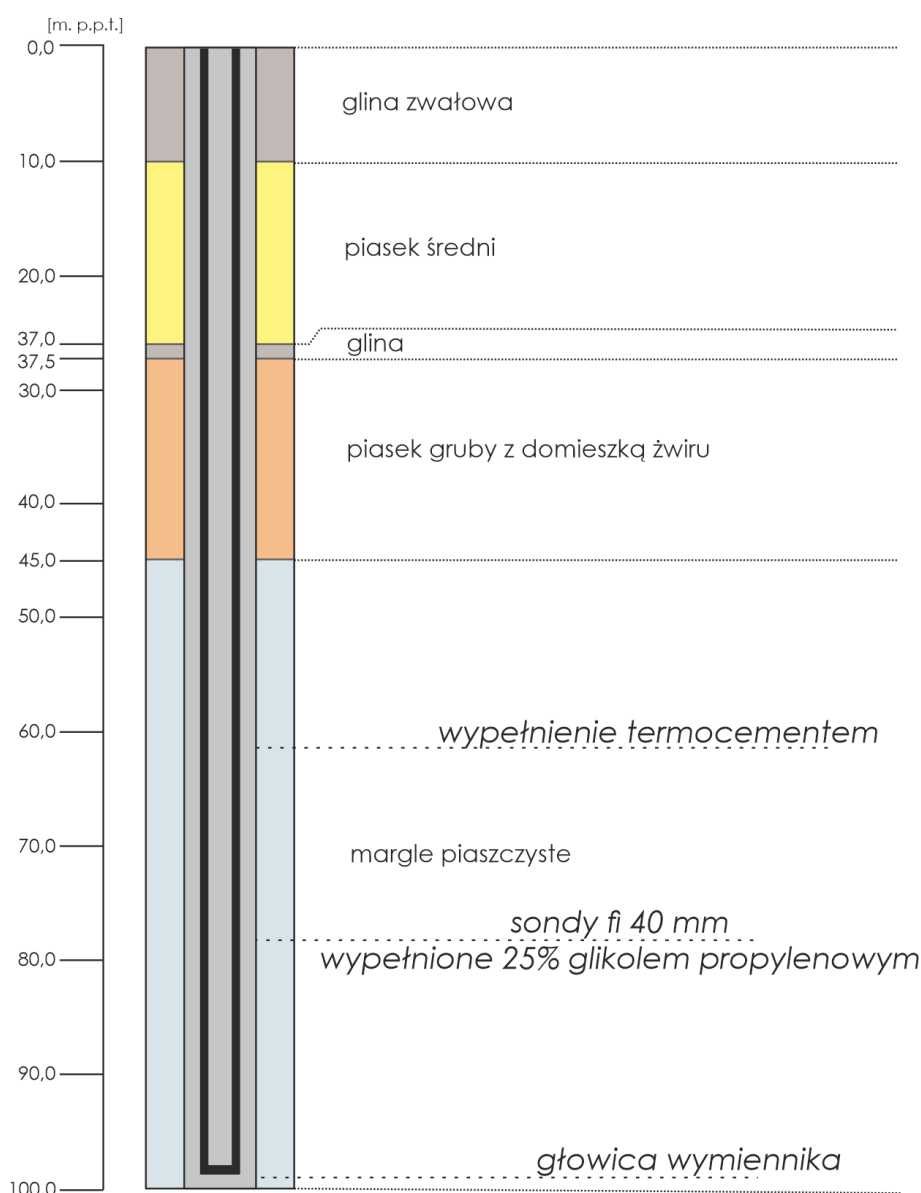
Dolne źródło pompy ciepła składa się z 30 odwiertów o głębokości 99 m każdy. Dla odwiertów wykonano 3 studnie rozdzielcze połączone z maszynownią rurami PE PN10  $\phi$ 125 mm, ułożonymi w układzie Tichelmanna. Między odwiertami a studniami rozdzielczymi wykonano połączenia z rur HDPE PN16  $\phi$ 40 mm. W odwiertach umieszczono 2 rury HDPE PN16  $\phi$ 40 mm połączone na końcu U-kształtką zintegrowaną z głowicą DWD.

Szczegółowe parametry instalacji znajdują się w tabeli (Tabela 8).

**Tabela 8 Parametry BTES w Zwoleniu, Polska**

BTES w Zwoleniu, budynek wielorodzinny			
Rozpoczęcie eksploatacji	2020	Układ wymienników	Nieregularny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	67 000	Medium akumulujące	Gliny, piaski, margle
Liczba otworów	30	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,50
Głębokość otworu [m]	99,9	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,34
Łączna głębokość otworów [m]	3000	Izolacja [Tak/Nie]	nie
Rozstaw otworów [m]	6	Energia ładowania/rok [MWh]	30
Średnica otworów [mm]	150	Energia rozładowywania/rok [MWh]	300
Rodzaj wymiennika	U-rura	Temperatura ładowania [°C]	20
Średnica wymiennika [mm]	40	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	10
Materiał wymiennika	HDPE	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	6
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	20	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie	Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	1 000

Omawiany teren znajduje się w obrębie niecki brzeżnej zbudowanej z utworów kredy zapadających monoklinalnie ku wschodowi. Na powierzchni obszaru inwestycji rozprzestrzenione są utwory czwartorzędowe, o miąższościach od 20 do 50 m. Odślaniają się tu ropy, mułki i piaski rzeczne preglacjalne najstarszego zlodowacenia. Osady zlodowaceń południowopolskich reprezentowane są przez gliny zwałowe. Utwory zlodowacenia środkowopolskiego występują powszechnie na powierzchni terenu. Dominują wśród nich gliny zwałowe. Maksymalny stadiał zlodowacenia środkowopolskiego reprezentowany jest przez małe wystąpienia piasków, żwirów i głazów moren czołowych. Obok utworów morenowych zaznaczają się większe wystąpienia piasków i żwirów wodnolodowcowych. Utwory trzeciorzędowe reprezentowane są przez morskie utwory paleocenu dolnego - gezy, ropy, mułki i piaski oraz margle a ich miąższość wynosi ok. 20 – 25 m. Poniżej zalegają utwory kredy, reprezentowane przez osady węglanowe – głównie margle, przewarstwione miejscami marglami ilastymi i ropy marglistymi, a także gezy, wapienie i sporadycznie piaski. Ich miąższość wynosi od 721 m do 902 m. Profil litologiczny stwierdzony w otworze wiertniczym wraz zabudową pokazano na rysunku (Rysunek 51).



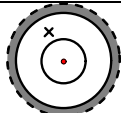
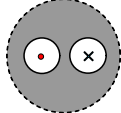
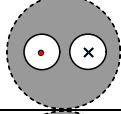
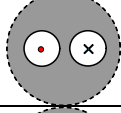
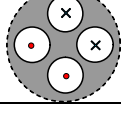
**Rysunek 51 Schemat odwiertu w Zwoleniu (Euros Energy)**

#### 4.1.2.4. Kraków - Laboratorium Geoenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Instalacje na terenach AGH w Krakowie i w Młoszowej są unikatowymi w skali światowej zespołami otworowych wymienników ciepła o różnych konstrukcjach. Od 2008 roku badane są różne parametry funkcjonalne wymienników otworowych, kiedy to ukończono 5 wymienników na polu A Laboratorium Geoenergetyki. Przez 16 lat wykonano na otworach setki testów reakcji termicznej (TRT) wykazując wiele prawidłowości oraz wyników porównawczych.

Spośród 46 otworowych wymienników ciepła na terenie AGH w Krakowie i w Młoszowej, 5 znajduje się na polu A (Rysunek 52) i oprócz badań, służy do ogrzewania/klimatyzacji sali audytorijnej w łączniku pawilonów A3 i A4 na terenie kampusu akademickiego w Krakowie. Na polu B, również w Krakowie, wywiercono 18 otworów pionowych i ukośnych i jeden odwiert pomiarowy. Są one wykorzystywane podobnie jak te na polu A, do badań i do ogrzewania/klimatyzacji korytarzy w nowym pawilonie D2. 23 wymienniki zostały zrealizowane w Zespole Pałacowo-Parkowym w Młoszowej (rys. 1), który również należy do AGH. Oprócz badań, będą one w przyszłości wykorzystywane do ogrzewania i/lub chłodzenia obiektów na terenie parku i w pałacu. Tabele (Tabela 9, Tabela 11 i Tabela 13) zawierają zestawienie konstrukcji wszystkich wymienników otworowych na terenie AGH w Krakowie i w Młoszowej. Tabele (Tabela 10, Tabela 12 i Tabela 14) przedstawiają parametry instalacji. Lokalizacje magazynów przedstawiono na rysunkach (Rysunek 53, Rysunek 54, Rysunek 55).

**Tabela 9 Lista otworowych wymienników ciepła na polu A w Krakowie w otworach o średnicy 143 mm**

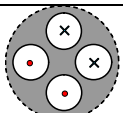
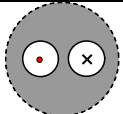
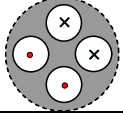
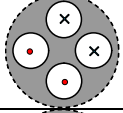
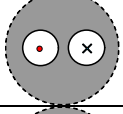
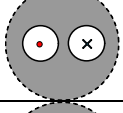
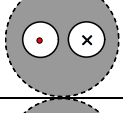
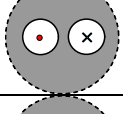
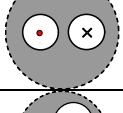
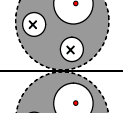
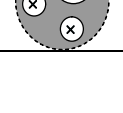
Nazwa wymiennika	Konstrukcja	Uszczelnienie/wypełnienie, przewodnictwo cieplne W/(mK)	Zewnętrzna średnica rury 1 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/material/producent	Zewnętrzna średnica rury 2 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/producent	Grubość ściany rury, rura 1 [mm] x rura 2 [mm]	Głębokość wymiennika otworowego, [m]
LG-1a		Cement, 1,2	90/0,42/-/-/PE/-	40/0,42/-/-/PE/-	5,4/2,4	78
LG-2a		Cement, 1,2	2 x 40/0,42/-/-/PE/-	-	2 x 2,4	78
LG-3a		Thermocem, 2,0	2 x 40/0,42/-/-/PE/-	-	2 x 2,4	78
LG-4a		Gravel, 1,8	2 x 40/0,42/-/-/PE/-	-	2 x 2,4	78
LG-5a		Cement, 1,2	4 x 32/0,42/-/-/PE/-	-	4 x 2,4	78

**Tabela 10 Parametry BTES w Krakowie (AGH), pole A, Polska**

BTES w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Pole A			
Rozpoczęcie eksploatacji	-	Układ wymienników	Nieregularny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	0,839	Medium akumulujące	Gokol monopropylenowy 33%
Liczba otworów	5	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,239
Głębokość otworu [m]	78	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,039
Łączna głębokość otworów [m]	390	Izolacja [Tak/Nie]	Tak

BTES w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Pole A			
Rozstaw otworów [m]	nieregularny	Materiał izolacyjny	Szkoło piankowe (szkło spienione)
Średnica otworów [mm]	143	Grubość izolacji [mm]	Nie dotyczy
Rodzaj wymiennika	Pojedyncza U-rurka Podwójna U-rurka Centryczny	Technologia źródła energii	górotwór
Średnica wymiennika [mm]	różna	Energia ładowania/rok [MWh]	5,606
Materiał wymiennika	HDPE	Energia rozładowywania/rok [MWh]	5,606
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	45	Temperatura ładowania [°C]	40
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	30
Liczba otworów w zespole	1	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	-5
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	390	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak

**Tabela 11 Lista otworowych wymienników ciepła na polu B w Krakowie**

Nazwa wymiennika	Konstrukcja	Uszczelnienie/wypełnienie	Zewnętrzna średnica rury 1 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/material/producent	Zewnętrzna średnica rury 2 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/producent	Grubość ściany rury, rura 1 [mm] x rura 2 [mm]	Głębokość wymiennika otworowego, m	Średnica otworu (świdra), mm
LG-1b		TermorotaS	4 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, gładka/MuoviTech	-	4 × 3,0	84,5	140
LG-2b		TermorotaS	2 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 3,0	84,5	140
LG-3b		TermorotaS	4 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	4 × 3,0	84,5	140
LG-4b		TermorotaS	4 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	4 × 3,0	84,5	140
LG-5b		TermorotaS	2 × 40/0,42/959/-/PE100 RC, gładka/MuoviTech	-	2 × 3,0	84,5	140
LG-6b		TermorotaS	2 × 40/0,42//959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 3,0	84,5	140
LG-7b		TermorotaS	2 × 45/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	-	84,5	140
LG-8b		TermorotaS	2 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 3,0	84,5	140
LG-9b		TermorotaS w interwale 0-20 m	2 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 2,9	84,5	140
LG-10b		TermorotaS	3 × 40/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	3 × 3,0	84,5	140
LG-11b		Beton	3 × 40/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	3 × 3,0	84,5	140

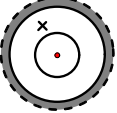
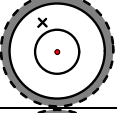
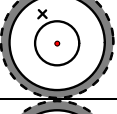
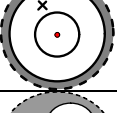
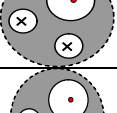
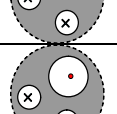
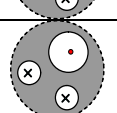
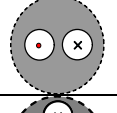
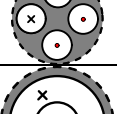
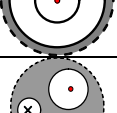
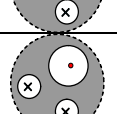
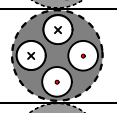
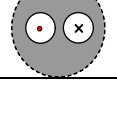


Nazwa wymiennika	Konstrukcja	Uszczelnienie/wypełnienie	Zewnętrzna średnica rury 1 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/material/producent	Zewnętrzna średnica rury 2 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/producent	Grubość ściany rury, rura 1 [mm] x rura 2 [mm]	Głębokość wymiennika otworowego, m	Średnica otworu (świdra), mm
LG-12b		TermorotaS	2 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 2,9	84,5	140
LG-13b		TermorotaS	Pierwsza U-rura: - φ32 – Turbocollector - φ40 – Turbocollector Druga U-rura: - φ32 – gładka - φ40 – gładka	-	2,9 3,0 3,0 3,0	84,5	140
LG-14b		TermorotaS z grafitem	2 × 32/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/MuoviTech	-	2 × 2,9	84,5	140
LG-15b		Beton	Rurka Cu <sup>a</sup> : jedno ramię 10 mm (przepływ w dół) i 12 mm (przepływ w górę) Rurka PE <sup>b</sup> : 40 mm	-	Cu: 1,0 mm PE: 3,0 mm	30	-
LG-16b		Beton	Rurka Cu <sup>a</sup> : jedno ramię 10 mm (przepływ w dół) i 12 mm (przepływ w górę)	Bezpośrednie parowanie	1 mm	30	-
LG-17b		Bentonit	2 × 45/0,42/959/-/PE100 RC, turbocollector/PRAWTECH	Horyzontalny – HDD, uszczelnione ilem	-	2 m p.p.t.; długość 117 m	-
LG-18b		Powietrze	2 × 45/0,42/959/-/PE/PRAWTECH	Horyzontalny – kanał, bez wypełnienia	-	2 m p.p.t.; długość 40 m	-

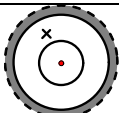
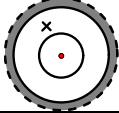
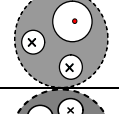
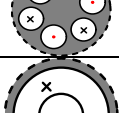
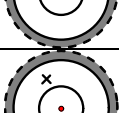
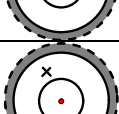
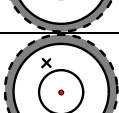

<sup>a</sup> - bezpośrednie parowanie czynnika roboczego  
<sup>b</sup> - pomiary temperatury

**Tabela 12 Parametry BTES w Krakowie (AGH), pole B, Polska**

BTES w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Pole B			
<b>Rozpoczęcie eksploatacji</b>	-	Układ wymienników	Nieregularny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	2,4	Medium akumulujące	Glikol propylenowy 33%
Liczba otworów	18	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	2,239
Głębokość otworu [m]	Każdy z otworów posiada różną głębokość	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,039
Łączna głębokość otworów [m]	1243 m (pionowe) 157 m (horyzontalne)	Izolacja [Tak/Nie]	Tak
Rozstaw otworów [m]	nieregularny	Materiał izolacyjny	-
Średnica otworów [mm]	140	Grubość izolacji [mm]	Nie dotyczy
Rodzaj wymiennika	Pojedyncza U-rurka Podwójna U-rurka Centryczny Trzyrurkowy (3 średnice takie same)	Technologia źródła energii	górtwór
Średnica wymiennika [mm]	różna	Energia ładowania/rok [MWh]	19,435
Materiał wymiennika	HDPE, Cu+PE	Energia rozładowywania/rok [MWh]	19,435
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	45	Temperatura ładowania [°C]	40
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	30
Liczba otworów w zespole	1	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	-5
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	1400	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Nie

**Tabela 13 Lista otworowych wymienników ciepła na polu C w Młoszowej**

Nazwa wymiennika	Konstrukcja	Uszczelnienie/wypelnienie	Zewnętrzna średnica rury 1 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/material/producent	Zewnętrzna średnica rury 2 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/producent	Grubość ściany rury, rura 1 [mm] x rura 2 [mm]	Głębokość wymiennika otworowego, [m]	Średnica otworu (świdra), [mm]
LG-1c		TermorotaS	90/0,42/-/- /PE100/ZINPLAST	63/-/-/ /PE100RC/ZINPLAST + 40/-/-/-/PE100RC SDR 13,6 PN 12,5/InstalPlast	5,4 / 3,8 / 3,0	77	140
LG-2c		Rehau	91/0,4/1800/- /fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/- /PVC/MuoviTech	2,7/4,6	82	140
LG-3c		MuoviTerm	91/0,4/1800/- /fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/- /PVC/MuoviTech	2,7 + 4,6	87,5	140
LG-4c		TermorotaS 2,0	91/0,4/1800/- /fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/- /PVC/MuoviTech	2,7 + 4,6	83,5	140
LG-5c		Żwir kvarcowy + TermorotaS*	1 × 45 / 2 × 32	-	4,1 + 2 × 3,0	90	140
LG-8c		TermorotaS	3 × 40/PE100RC/-	-	2,4 + 2 × 3,7	85	140
LG-9c		TermorotaS	3 × 40/PE100RC/-	-	3,7 + 2 × 2,4	87	140
LG-10c		TermoCem	3 × 40/PE100RC/-	-	3,0 + 3,7 + 3,7	88	140
LG-12c		TermorotaS	2 × 50/-	-	2 × 3,0	75	140
LG-13c		TermoCem	4 × 32/-	-	4 × 3,0	82	140
LG-14c		MuoviTerm	90/PE100/-	50/-/-/-/PE100RC	5,4 + 3,0	85	140
LG-15c		Żwir kvarcowy + TermorotaS*	1 × 45 + 2 × 32/-	-	4,1 + 2 × 3,0	90	140
LG-16c		Żwir kvarcowy + TermorotaS*	1 × 45 + 2 × 40/-	-	4,1 + 2 × 3,7	93	140
LG-17c		Żwir kvarcowy + TermorotaS*	4 × 32/-	-	4 × 3,0	97	140
LG-18c		Żwir kvarcowy + TermorotaS*	2 × 40/-	-	2 × 3,7	100	140

Nazwa wymiennika	Konstrukcja	Uszczelnienie/wypelnienie	Zewnętrzna średnica rury 1 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/material/producent	Zewnętrzna średnica rury 2 [mm]/przewodnictwo cieplne materiału [W/(mK)]/gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]/ciepło właściwe [J/(kgK)]/producent	Grubość ściany rury, rura 1 [mm] x rura 2 [mm]	Głębokość wymiennika otworowego, [m]	Średnica otworu (świdra), [mm]
LG-19c		TermoCem	90/PE100/-	32/-/-/PE100RC	5,4 + 3,0	97	140
LG-20c		TermorotaS (450 kg)	90/PE100/-	63/-/-/PE100RC	5,4 + 5,8	85	140
LG-21c		Żwir kwarcowy + TermorotaS*	1 × 50 + 2 × 32/-	-	4,1 + 2 × 3,7	90	140
LG-22c		MuoviTerm	6 × 32/-	-	6 × 3,0	84	140
LG-23c		TermorotaS	90/-/PE100	40/-/-/PE100RC	5,4 + 3,0	90	140
LG-25c		TermoCem	90/-/PE100	50/-/-/PE100RC + 32/-/-/PE100RC	5,4 + 3,0 + 3,0	71	140
LG-31c		TermorotaS	91/0,4/1800/- fiberglass/MuoviTech	60/0,15/1400/-/PVC	2,7 + 4,6	96,5	168,3/140
LG-34c		Rehau	90/-/PE100	50/-/PE100RC	5,4 + 3,0	84	140

**Tabela 14 Parametry BTES w Młoszowej (AGH), pole C, Polska**

BTES w Krakowie, Laboratorium Geoenergetyki, Pole C <sup>a</sup>			
Rozpoczęcie eksploatacji	-	Układ wymienników	Nieregularny
Objętość [m <sup>3</sup> ]	6,6	Medium akumulujące	woda
Liczba otworów	23	Przewodność cieplna [W/(m*K)]	3,20
Głębokość otworu [m]	Każdy z otworów posiada różną głębokość	Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2,49
Łączna głębokość otworów [m]	1999,5	Izolacja [Tak/Nie]	Tak
Rozstaw otworów [m]	nieregularny	Materiał izolacyjny	Szko piankowe (szko spienione)
Średnica otworów [mm]	140	Grubość izolacji [mm]	Nie dotyczy
Rodzaj wymiennika	Pojedyncza U-rurka; Podwójna U-rurka; Potrójna U-rurka; Centryczny; Trzyrurkowy (2 średnice mniejsze, 1 większa); Trzyrurkowy (3 średnice takie same)	Technologia źródła energii	górotwór
Średnica wymiennika [mm]	40	Energia ładowania/rok [MWh]	W trakcie realizacji
Materiał wymiennika	HDPE, PVC, Fiberglass	Energia rozładowywania/rok [MWh]	W trakcie realizacji
Maksymalna temperatura czynnika [°C]	45	Temperatura ładowania [°C]	40
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Nie	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	30
Liczba otworów w zespole	1	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	-5
Całkowita długość wymiennika w zespole [m]	1999,5	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Nie

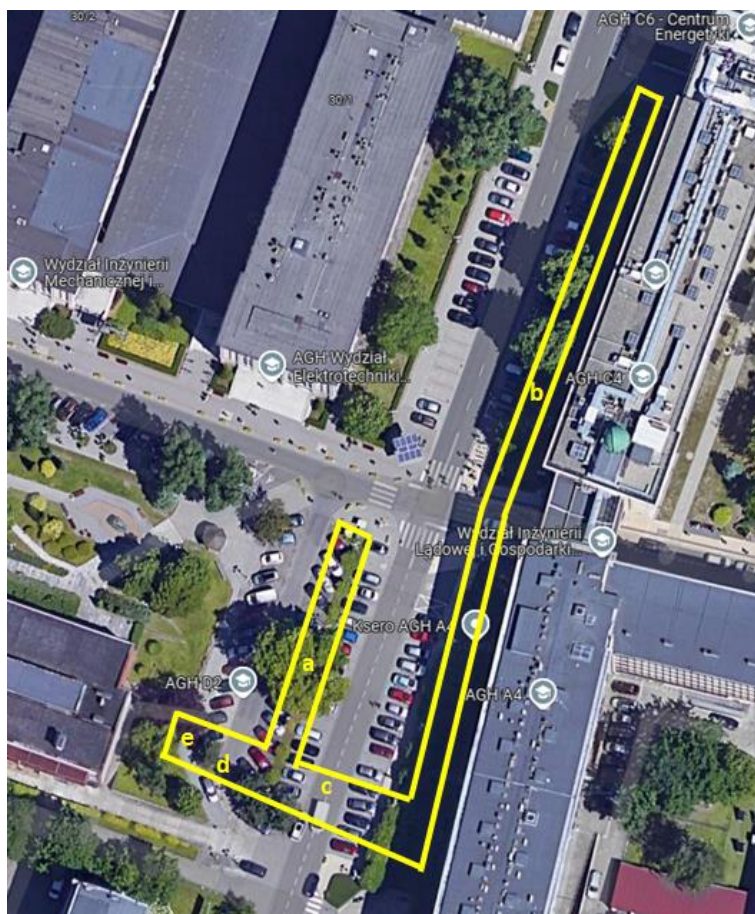
<sup>a</sup> – instalacja wymienników otworowych jest przed podpięciem do instalacji grzewczo-chłodniczej, co nastąpi w 2025/26 r. najwcześniej, stąd brak danych o ilości energii



**Rysunek 52 Pałac Florkiewiczów w Młoszowej**



**Rysunek 53 Pole A - teren pomiędzy pawilonami A3 i A4 na kampusie AGH w Krakowie, a – lokalizacja otworowych wymienników ciepła oraz kolektorów słonecznych ładujących ciepło do górotworu, b – pomieszczenie laboratoryjne z instalacją pomp ciepła oraz dry cooler`em, c – kolektor słoneczny w postaci instalacji ogrzewczej do odsnieżania w konstrukcji parkingu 250 m<sup>2</sup>, d – sala audytoryjna**



**Rysunek 54 Pole B – teren pomiędzy pawilonami A4 i D2 na kampusie AGH w Krakowie, a – lokalizacja pionowych i ukośnych otworowych wymienników ciepła, b – horyzontalny uszczelniony otworowy wymiennik ciepła o długości 117 m, c – horyzontalny nieszczelniony otwór**



**Rysunek 55 Pole C – teren Zespołu Pałacowo-Parkowego w Młoszowej, a - lokalizacja otworowych wymienników ciepła, b – neogotycki Pałac Florkiewiczów**

## **4.2. Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych – PTES**

### **4.2.1. Wybrane doświadczenia zagraniczne**

#### **4.2.1.1. Dronninglund, Dania**

Magazyn ciepła PTES w Dronninglund w Danii, rozpoczął pracę w 2014 roku. Został wykonany w ramach projektu "Sunstore 3", wspieranego przez krajowy duński program EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Program). Celem projektu było wykonanie demonstracyjnej instalacji łączącej fotowoltaikę z magazynem ciepła w celach grzewczych (ogrzewanie miejskie).

Głównym zadaniem paneli PVT w Dronninglund jest dostarczanie ciepłej wody bezpośrednio do sieci ciepłowniczej. W miesiącach letnich elektrownia słoneczna wytwarza znacznie więcej ciepła niż zużywa miasto. Nadwyżka wykorzystywana jest do podgrzania magazynu PTES. Jesienią zasobnik jest schładzany poprzez dolewanie wody o temperaturze powrotu z sieci ciepłowniczej (około 40°C) na dno zasobnika i przesyłanie gorącej wody z góry zasobnika do miasta. Aby dalej wykorzystać magazyn, jest on schładzany do 10°C i wykorzystywany jako źródło ciepła dla pomp ciepła. Zwiększa to pojemność magazynową przed kolejnym latem oraz zmniejsza straty ciepła. Pompa ciepła

wykorzystuje wodę akumulacyjną jako źródło ciepła i wytwarza ciepło sieciowe przy temperaturze zasilania (Rysunek 56).



**Rysunek 56 Elektrownia słoneczna z sezonowym magazynem ciepła PTES w Dronninglund (Gauthier, 2020)**

Teren pod inwestycje został przygotowany na obszarze nieczynnej żwirowni. Otaczający zbiornik grunt to piaski i żwiry o różnej granulacji. Zwierciadło wód podziemnych znajduje się około 3 m poniżej dna magazynu, co było istotnym ułatwieniem podczas realizacji projektu.

Zbiornik posiada 3 przyłącza z dyfuzorami, mającymi za zadanie zmniejszać mieszanie spowodowane strumieniem wlotowym, co pomaga w utrzymaniu stratyfikacji termicznej (Rysunek 57).

Konstrukcja zbiornika była modyfikowana, oryginalna pokrywa uległa awarii, spowodowanej przez nieszczelność w jej dolnej części, co doprowadziło do przedostania się wody w konstrukcję pokrywy. Pomimo nieodwracalnego uszkodzenia, duża część starej izolacji została poddana recyklingowi i użyta ponownie podczas konstrukcji nowej pokrywy. Nowa konstrukcja pozwala na dyfuzję pary oraz odwadnianie, ponadto jest podzielona na sekcje, co rozwiązało problemy z gromadzeniem się wody w przypadku opadów. Każda sekcja jest zaprojektowana z wewnętrznym spadkiem w kierunku studni pompowej w środku (Rysunek 58) (<https://stateofgreen.com/en/solutions/lid-solution-for-ptes-in-dronninglund-denmark/>).



**Rysunek 57** Wysokość dyfuzorów zamontowanych podczas instalacji zbiornika w Dronninglung (Dahash i in., 2020)

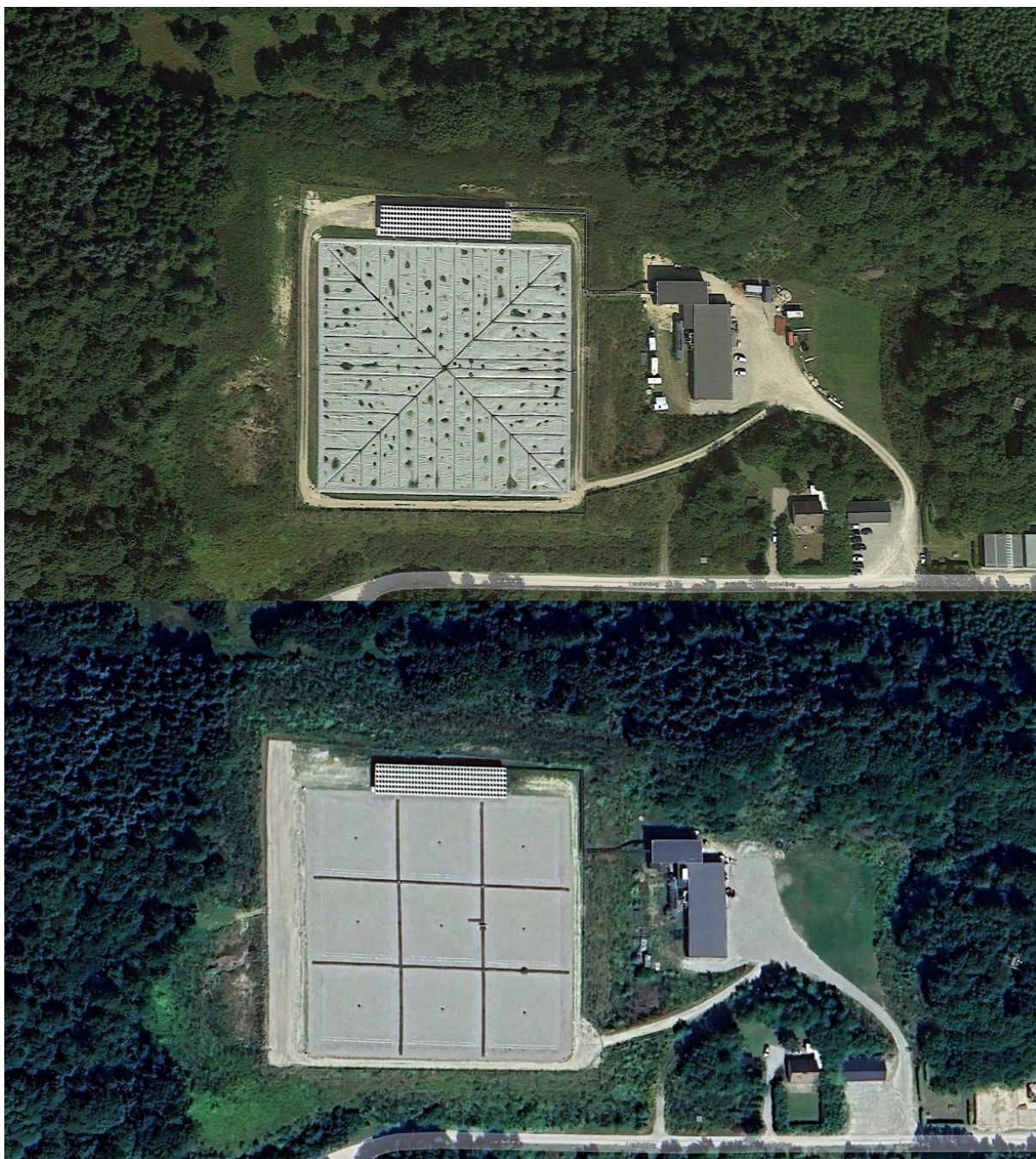
Szczegóły dotyczące zbiornika znajdują się w tabeli (Tabela 15).

**Tabela 15** Parametry PTES w Dronninglung w Danii

PTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	60 000	Głębokość zbiornika [m]	16
Powierzchnia pokrywy [m <sup>2</sup> ]	8351	Srednica zbiornika [m]	128
Izolacja [Tak/Nie]	Tak	Nachylenie ścian magazynu	1:2
Materiały izolacyjne	usieciowana pianka PE	Medium akumulujące	woda
Technologia źródła energii	panele słoneczne	Maksymalna pojemność ładowania/rozładowywania [MW]	27
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	89
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	12
Grubość izolacji [cm]	24	Pojemność [MWh]	5400
Przewodność cieplna izolacji [W/(m*K)]	0.04		

Wyzwaniem dla tej inwestycji było również zjawisko korozji w zbiorniku wypełnionym wodą, pomimo zastosowania komponentów ze stali nierdzewnej. W celu uniknięcia niekorzystnych zjawisk z tym związanych zdecydowano się poddać wodę procesowi odwróconej osmozy w celu usunięcia soli (zwłaszcza chlorków) i podwyższenia pH do wartości 9,6-9,8, a także zastosowano szereg filtrów chroniących wymienniki ciepła. Woda w zbiorniki minimum raz w roku jest analizowana pod kątem zawartości tlenu, soli, bakterii oraz pH.

System monitoringu obejmuje 32 czujniki temperatury rozmieszczone na różnych głębokościach wewnątrz magazynu ciepła PTES.



**Rysunek 58 Zdjęcie zbiornika w 2020 (na górze) i 2022 roku (na dole), wymiana pokrywy (Google Earth)**

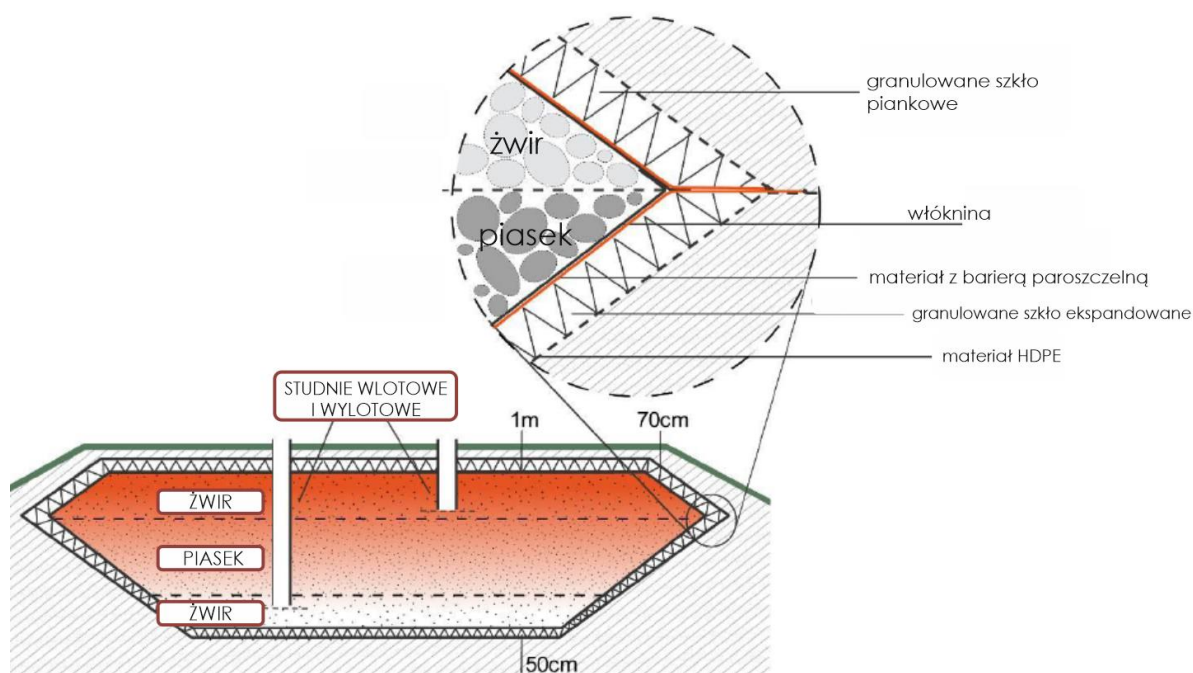
#### **4.2.1.2. Eggenstein-Leopoldshafen, Niemcy**

Magazyn ciepła typu PTES w Niemczech, w gminie Eggenstein-Leopoldshafen, powstał w latach 2008-2009. Zajmujący powierzchnię około 12 000 m<sup>2</sup> kompleks obejmujący szkołę, salę gimnastyczną, kryty basen oraz budynki komunalne został wyposażony w dachowe kolektory słoneczne o łącznej powierzchni 1600 m<sup>2</sup>, zasilające wszystkie te budynki. Magazyn ciepła powstał w celu osiągnięcia wysokiego udziału energii słonecznej w całkowitej produkcji ciepła centrum szkolno-sportowego. Jest to pierwszy system w Niemczech powstały do istniejącego już, renowowanego budynku. Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 16).

**Tabela 16 Parametry PTES w Eggenstein-Leopoldshafen, Niemcy**

PTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	4 500	Wysokość zbiornika [m]	9
Powierzchnia pokrywy [m <sup>2</sup> ]	1925	Średnica pokrywy [m]	35
Izolacja [Tak/Nie]	Tak	Maksymalny kąt nachylenia ścian zbiornika [°]	35
Materiały izolacyjne	HDPE (ang. high density polyethylene), szkło ekspandowane, żwir szklany	Medium akumulujące	Żwir/piasek i woda
Technologia źródła energii	panele fotowoltaiczne	Efektywna pojemność cieplna	220 MWh <sub>th</sub>
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	80
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	10
Grubość izolacji [cm]	dno: 50, ściany: 50-70, pokrywa: 100, powierzchniowa warstwa gruntu: 30		

Ze względu na umiejscowienie zbiornika na terenie szkoły, aby uniknąć potencjalnych niebezpiecznych awarii, zdecydowano się na wypełnienie zbiornika gruntem, a nie gorącą wodą. Magazyn wypełniony jest dwoma warstwami żwiru o średnicy 16-32 mm (na dole i górze zbiornika), przedzielonymi warstwą piasku, który został pobrany z wykopu, co pozwoliło na zminimalizowanie kosztów (Rysunek 59, Rysunek 60). Warstwa piasku oddzielona jest od warstw żwiru włókniną, w celu zabezpieczenia przed wymywaniem drobnych cząstek.



**Rysunek 59 Konstrukcja magazynu ciepła PTES w Eggenstein-Leopoldshafen (Paushhinger (red.), 2018)**



**Rysunek 60 Magazynu ciepła PTES w Eggenstein-Leopoldshafen podczas konstrukcji (Paushhinger (red.), 2018)**

Woda podziemna w miejscu PTES znajduje się na głębokości 7,5 m pod poziomem terenu. Magazyn został zaprojektowany tak, aby nawet w przypadku znaczącego podniesienia się poziomu wód podziemnych, izolacja termiczna była odporna na jej wpływ.

Ściany magazynu zbudowane są z wykładziny kompozytowej, materiałów izolacyjnych oraz polietylenu wysokiej gęstości (HDPE). W celu uniknięcia dyfuzji pary wodnej z magazynu do izolacji, wewnętrzna wykładzina kompozytowa zbudowana jest z warstwy aluminiowej znajdującej się pomiędzy dwiema warstwami HDPE. Na dnie oraz ścianach zbiornika rolę warstwy izolacyjnej pełni granulata szkła ekspandowanego (50-70 cm), przy pokrywie zbiornika jest to granulowane szkło (100 cm). Magazyn ładowany i rozładowywany jest przy pomocy dwóch pionowych studni wlotowo-wylotowych (jedna w górnej warstwie żwirów, druga w dolnej) (Pauschinger (red.), 2018).

W sytuacji kiedy ciepło magazynowane w PTESie nie osiąga wystarczająco wysokich temperatur, aby przesyłać je bezpośrednio do sieci ciepłowniczej, układ korzysta z pomp ciepła. Taki system pozwala na zmniejszenie strat ciepła oraz umożliwia korzystanie ze zbiornika podczas zimy, kiedy temperatury magazynowania są niższe.

Magazyn i otaczający grunt są wyposażone w kilka czujników PT100. Dodatkowo zamontowane są czujniki strumienia ciepła w celu monitorowania lokalnych strat ciepła. Czujniki temperatury umożliwiają pomiar na układach wlotowych i wylotowych, pompach ciepła oraz dodatkowym zbiorniku buforowym. Zamontowana jest również stacja meteorologiczna monitorująca temperaturę otoczenia, promieniowanie słoneczne oraz prędkość wiatru (Ochs i in., 2008). Podczas eksploatacji zbiornika napotkano problemy z zasysaniem wody przez układ wylotowy oraz stratami ciepła przy pokrywie zbiornika, które są wyższe niż zakładano. Zaleca się również monitoring poziomu wód podziemnych, temperatury warstwy wodonośnej oraz prędkości i kierunku przepływu, jako czynników mogących mieć duży wpływ na potencjalne straty energii.

Zbiornik pokryty jest 30 cm warstwą gruntu, pozwalającą na zagospodarowanie przestrzenne terenu nad nim (Rysunek 61).



**Rysunek 61** Kompleks zasilany energią słoneczną wraz z magazynem PTES (Google Earth)

#### **4.2.1.3. Marstal 2 (Sunstore 4), Dania**

Magazyn typu PTES w gminie Marstal w Danii jest częścią odnawialnego w 100% systemu sieci ciepłowniczej, łączącej technologie TES, biomasy oraz pomp ciepła. Powstał w ramach projektu "Sunstore 4", wspieranego przez krajowy duński program EUDP (Energy Technology Development and Demonstration Program). Proces implementacji zbiornika miał miejsce w latach 2011-2012, kiedy

to system sieci ciepłowniczych Marstal był drugą największą na świecie siecią zasilaną energią słoneczną. Szczegóły dotyczące instalacji znajdują się w tabeli (Tabela 17).

**Tabela 17 Parametry PTES w Marstal w Danii**

PTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	75 000	Wysokość zbiornika [m]	16
Powierzchnia pokrywy [m <sup>2</sup> ]	9944	Średnica pokrywy [m]	143
Izolacja [Tak/Nie]	Tak	Maksymalny kąt nachylenia zbiornika [°]	26,6
Materiały izolacyjne	HDPE, polietylen	Medium akumulujące	woda
Technologia źródła energii	panele słoneczne	Efektywna pojemność cieplna [MWh]	6000
Stratyfikacja termiczna [Tak/Nie]	Tak	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	75-85
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	17
Grubość izolacji [cm]	ok. 25 cm		

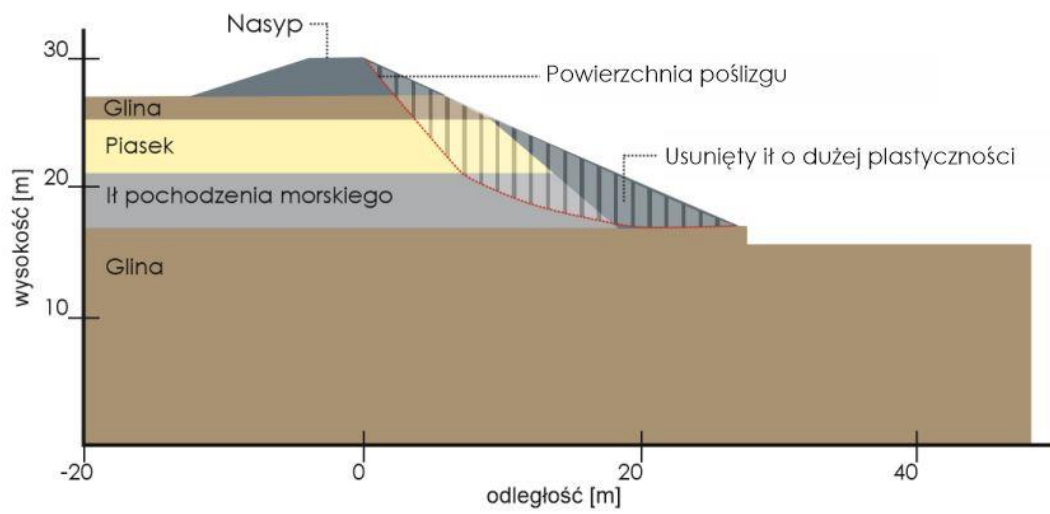
Przed wykonaniem zbiornika zrealizowano dokładne rozpoznanie podłoża, między innymi ze względu na płytkie występowanie zwierciadła wód podziemnych i związane z tym możliwe komplikacje. W centrum wykopu wykonano 10 odwiertów o głębokości 25 metrów, na jego obrzeżach wykonano 8 odwiertów o głębokości 13 metrów. W podłożu rozpoznano osady lodowcowe w postaci glin zwałowych, ily z okresu interglacjału oraz ily genezy morskiej, a także trzymetrową warstwę piasków fluwioglacjalnych zalegających na glinach w północnej części wyrobiska. Obecne są także lokalne soczewki piasków w ily. Ily morskie charakteryzowały się wysoką plastycznością i wilgotnością zbliżoną do granicy plastyczności. Rozpoznano również spękania w pobranych próbkach, spowodowane naprężeniem ścinającym w okresie lodowcowym. Ily genezy lodowcowej oceniono jako zwarte i bardzo zwarte.

Podczas konstrukcji planowano wymianę warstwy gruntów spoistych pochodzenia morskiego z podłoża na piasek, jednak finalnie udało się wykonać stabilny wykop przy minimalnej objętości wymienionego gruntu (Rysunek 62). Podczas wykonywania prac teren był również odwadniany, do czasu wypełnienia magazynu do wysokości pierwotnego poziomu wód podziemnych (Andersen, 2013) (Rysunek 63).

Oryginalna pokrywa zbiornika wykonana została z 2 mm warstwy HDPE, na której znajdowała się siatka drenażowa, następnie warstwa 24 cm materiału izolacyjnego z polietylenu, kolejna siatka drenażowa i finalnie 1 mm warstwa HDPE. Ze względu na ryzyko zbierania się wody opadowej na pływającej pokrywie PTES, zdecydowano się na obciążenie jej w taki sposób, żeby woda opadowa spływała na środek pokrywy, gdzie była wypompowywana. Ściany i dno zbiornika pokryto szczelną, izolacyjną termicznie geomembraną. Podczas pracy magazynu w izolacji pojawił się przeciek o wielkości 7 cm, który został naprawiony przez nurków (Pauschinger (red.), 2018).

Oryginalna pokrywa okazała się podatna na problemy dotyczące akumulacji wilgoci w warstwach izolacji oraz zbierania się wody opadowej na powierzchni pokrywy (woda była usuwana za pomocą dwóch pomp na środku konstrukcji, co nie zapewniało odpowiedniej wydajności). Podobnie jak w Dronninglung, pokrywa uległa zniszczeniu i została wymieniona na taką, która umożliwia dyfuzję pary, oraz pozwala na lepsze odwadnianie dzięki podzieleniu jej na sekcje (Rysunek 64).

Zbiornik posiada 3 układy wlotowo-wylotowe, na których zamontowane są czujniki temperatury i objętości przepływu. Monitorowana jest również temperatura gruntu wokół zbiornika. Przy warstwie izolacyjnej znajdują się czujniki strumienia cieplnego i temperaturowe. Obecna praca magazynu jest zgodna z założeniami projektowymi.



**Rysunek 62 Przykładowe założenia przy kalkulacjach stateczności skarp (Andersen i in., 2013)**



**Rysunek 63 Zbiornik podczas budowy (Jensen, 2014)**



**Rysunek 64 Zdjęcie zbiornika w 2019 (no górze) i 2020 roku (na dole), wymiana pokrywy (Google Earth).**

#### **4.2.2. Wybrane doświadczenia krajowe**

##### **4.2.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości**

W Polsce obecnie znajduje się jeden magazyn typu PTES, wykonany w ramach Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim. Został on szczegółowo opisany w rozdziale 4.1.2.1.

## 4.3. Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach podziemnych – TTES

### 4.3.1. Wybrane doświadczenia zagraniczne

#### 4.3.1.1. Freidrichshafen, Niemcy

Zbiornik typu TTES w Friedrichshafen w Niemczech, powstał w 1996 jako jeden z pilotażowych systemów magazynowania energii słonecznej. Zapewnia on ogrzewanie dla dwóch stref mieszkalnych (280 mieszkań, domy wielorodzinne) o całkowitej powierzchni grzewczej 39500 m<sup>2</sup>.

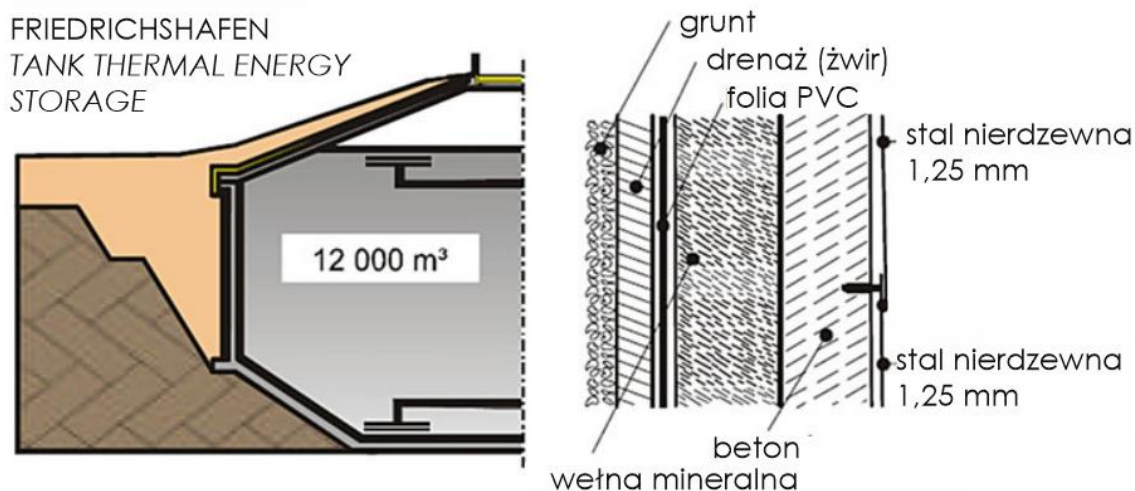
Priorytetowym źródłem energii w systemie grzewczym w Friedrichshafen są panele słoneczne. Jeżeli nie są one wystarczające, dochodzi do poboru energii ze zbiornika TTES. Zmagazynowana energia jest również pobierana w celu zmniejszenia zużycia gazu ziemnego.

Szczegóły TTES w Friedrichschafen przedstawione są w tabeli (Tabela 18).

**Tabela 18 Parametry TTES w Friedrichschafen, w Niemczech**

TTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	12 000	Wysokość zbiornika [m]	20
Izolacja [Tak/Nie]	Tak (na ścianach i pokrywie zbiornika)	Średnica zbiornika [m]	32
Materiał zbiornika	żelbeton z wkładką ze stali nierdzewnej	Medium akumulujące	woda
Materiał izolacyjny	wełna mineralna	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	81
Technologia źródła energii	panele słoneczne	Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Nie

Przed wykonaniem zbiornika zostało wykonane rozpoznanie podłoża, które wykazało ponad 20 metrową warstwę ilów o bardzo niskiej przepuszczalności. Nie natrafiono na poziom wodonośny. Konstrukcja została zaplanowana w taki sposób, aby nie było potrzeby umieszczania belek podtrzymujących dach magazynu, co zmniejszyło ryzyko awarii (Rysunek 65). Przyczynił się do tego kształt zbiornika, w którym średnica jest większa od wysokości. Dno magazynu ma kształt ściętego stożka, co wpłynęło na zmniejszenie zakresu prac ziemnych i kosztów wykopu. Ściany magazynu wykonane zostały z nieprzepuszczalnego żelbetonu z wkładką ze stali nierdzewnej. Izolację, zastosowaną na ścianach i dachu magazynu, zapewnia wełna mineralna (Kübler i in., 1997). Magazyn posiada dwa układy wylotowo-wlotowe, na dole i na górze zbiornika.



**Rysunek 65 Konstrukcja magazynu ciepła TTES w Friedrichschafen (Bespalsko i in., 2018)**

Podczas eksploatacji zbiornika pomierzono wyższe temperatury na powrocie z sieci ciepłowniczej, niż zakładano. Przyczyniło się to do pracy magazynu na wyższych niż planowanych temperaturach, a co za tym idzie większych strat ciepła. Wyższa temperatura robocza zasobnika ciepła spowodowała również wyższe temperatury w obwodzie kolektora słonecznego a tym samym zmniejszoną wydajność kolektora (Pavlov, Olesen, 2011).

Analiza kosztów zbiornika w Friedrichshafen wykazała, że wewnątrz część ze stali nierdzewnej jest bardzo kosztownym elementem konstrukcji, stąd też w nowych koncepcjach konstrukcji zalecono użycie żelbetonu o wysokiej gęstości.

#### 4.3.1.2. Monachium, Niemcy

Magazyn typu TTES w Monachium, na osiedlu Ackermannbogen, został uruchomiony w 2007 roku (Rysunek 66). Około połowy zapotrzebowania na energię ciepłą osiedla pokrywają panele słoneczne. Kiedy ilość energii ciepłej z paneli słonecznych przerasta zapotrzebowanie lokalnej sieci ciepłowniczej, magazyn jest ładowany, ma to miejsce głównie w okresie letnim. Do systemu dołączono absorpcyjne pompy ciepła, które są zasilane przez ciepłą wodę z sieci miejskiej i podnoszą niskotemperaturowe ciepło z magazynu do temperatur nadających się do celów grzewczych, zwiększając w ten sposób ilość magazynowanej energii w systemie (Radspieler i in., 2013). W okresie zimowym zmagazynowane nadwyżki wykorzystywane są do ogrzewania oraz dostarczania ciepłej wody użytkowej do 319 mieszkań o całkowitej powierzchni grzewczej 30 400 m<sup>2</sup>. System grzewczy w Ackermannbogen działa jako kogeneracja (CHP), wszystkie budynki wykonane są również z materiałów zapewniających im dobrą izolację termiczną. Zbiornik TTES jako dopełnienie tych technologii pozwolił na redukcję emisji CO<sub>2</sub> o około 42% (<https://www.energyxpert.com/products/munich-model-6-000-000-litres-bespoke-tank-222847>).

Szczegóły dotyczące zbiornika znajdują się w tabeli (Tabela 19).

**Tabela 19 Parametry TTES w Monachium, w Niemczech**

TTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	5 700	Wysokość zbiornika [m]	brak informacji
Izolacja [Tak/Nie]	Tak, pokrywa, dno oraz ściany	Średnica zbiornika [m]	brak informacji
Materiał zbiornika	żelbeton z wkładką ze stali nierdzewnej	Medium akumulujące	woda
Materiał izolacyjny	szkło ekspandowane, szkło piankowe	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	90
Technologia źródła energii	panele słoneczne	Minimalna temperatura magazynowania [°C]	15
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak		

Dno i dach zbiornika mają kształt ściętych stożków. Ściany zrobione są z żelbetonowych sekcji z wkładką ze stali nierdzewnej (Rysunek 67). Dolna część magazynu została wybudowana na miejscu, natomiast ściany i pokrywa były prefabrykowane. W zbiorniku znajduje się urządzenie pomagające utrzymać dobrą stratyfikację termiczną dzięki ładowaniu i rozładowywaniu magazynu nie doprowadzającym do ruchu turbulentnego wody.

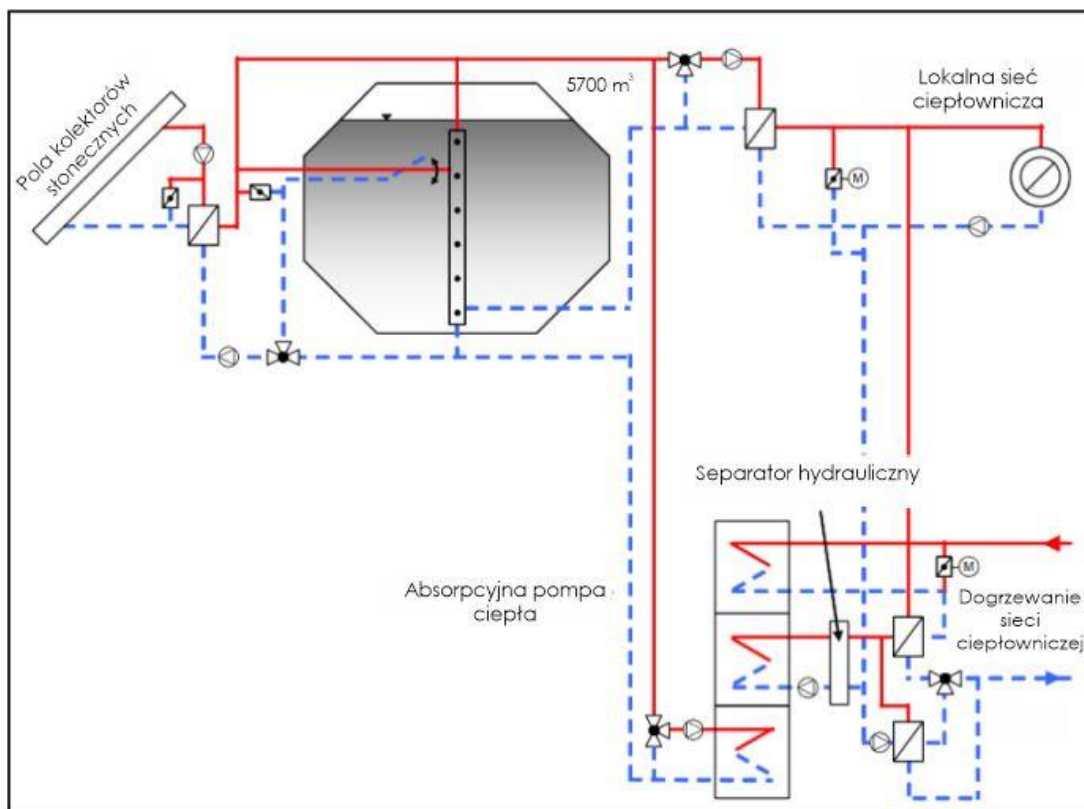
Magazyn izolowany jest od góry oraz na ścianach szkłem ekspandowanym, dochodzącym przy pokrywie do 70 cm grubości. Zamontowano pionowy system drenujący, zapobiegający zawadnieniu izolacji. Dno zbiornika izolowane jest 20 centymetrową warstwą szkła piankowego, ze względu na wyższą wytrzymałość na obciążenia statyczne (Mangold i Deschaintre, 2012).

Do pewnego poziomu zbiornik znajduje się pod powierzchnią terenu, a jego nadziemna część przysypana jest gruntem z wykopu (Rysunek 68, Rysunek 69). Nasyp zapewnił nie tylko dodatkową izolację, ale także umożliwił zintegrowanie konstrukcji z krajobrazem.

W miejscu wybudowania magazynu rozważana była również technologia BTES i ATES, jednak z pomysłu zrezygnowano po analizie podłoża gruntowego. Pod uwagę wzięto również zbiornik PTES, jednak wymagana ilość magazynowanej energii i zakładany poziom stratyfikacji nie zostały osiągnięty w zbiorniku żwirowo-wodnym.



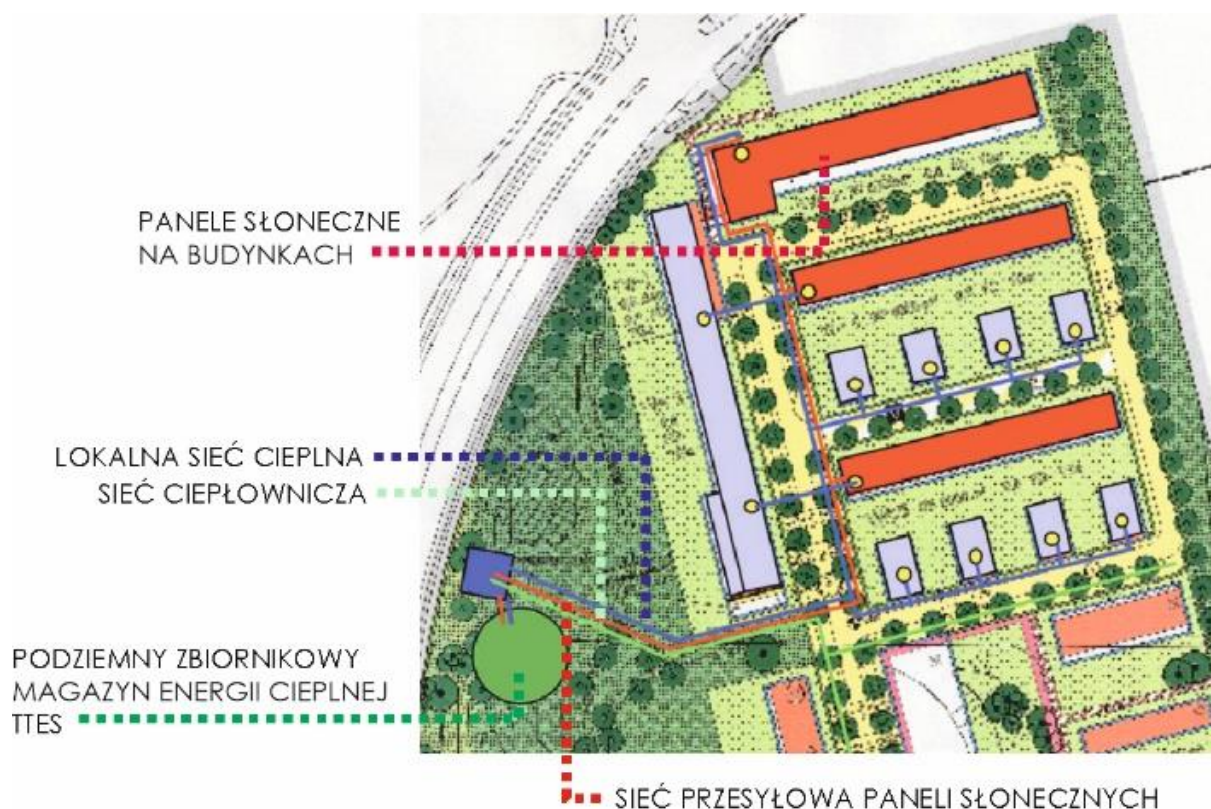
**Rysunek 66 Magazyn ciepła TTES w Monachium podczas konstrukcji (<https://stadt.muenchen.de/>)**



**Rysunek 67** Konstrukcja wewnętrzna magazynu ciepła TTES w Monachium. (Deutsche Energie-Agentur., 2023))



**Rysunek 68** Magazyn ciepła TTES w Monachium, obsypany i zintegrowany z krajobrazem (<https://www.saisonalspeicher.de/>)



**Rysunek 69** Integracja magazynu ciepła z siecią ciepłowniczą (Monachium osiedle Ackermannbogen (<https://stadt.muenchen.de/>))

#### 4.3.1.3. Hannover Kronsberg, Niemcy

Magazyn TTES w Kronsberg w Niemczech zasilany jest nadwyżką energii z paneli słonecznych, które pokrywają 40% zapotrzebowania okolicznych budynków (106 apartamentów wielorodzinnych) (Rysunek 70). Kiedy magazyn przestaje być wystarczająco wydajny, mieszkania zasilane są przez sieć ciepłowniczą (osiedle zasilane jest głównie dzięki energii turbin wiatrowych oraz paneli słonecznych). Dzięki użyciu TTES energia solarna może być wykorzystywana do ogrzewania w okresie od wiosny do grudnia.

Szczegóły dotyczące zbiornika znajdują się w tabeli (Tabela 20).

**Tabela 20** Parametry TTES w Kronsberg, w Niemczech

TTES			
Objętość [m <sup>3</sup> ]	2 750	Wysokość zbiornika [m]	11
Izolacja [Tak/Nie]	Tak	Technologia źródła energii	panele słoneczne
Materiał zbiornika	żelbeton o wysokiej gęstości	Medium akumulujące	woda
Materiał izolacyjny	szkło piankowe w workach z geomembrany	Maksymalna temperatura magazynowania [°C]	95

Zbiornik skonstruowany jest z żelbetonu o wyjątkowo wysokiej gęstości, co umożliwiło zrezygnowanie z wkładki ze stali nierdzewnej (Rysunek 71). Taki żelbeton nie jest w stanie zapewnić jednak całkowitej ochrony przed dyfuzją pary wodnej przez ściany przy wysokich temperaturach, dlatego też dodana została warstwa paroizolacji.

W zbiorniku oprócz dwóch układów wlotowo-wylotowych (na górze i dole zbiornika) znajduje się jeden dodatkowy, umiejscowiony w 1/3 wysokości magazynu. Pozwala on na elastyczne użycie wody o różnej temperaturze i pobór z dodatkowej warstwy temperaturowej, którą zapewnia stratyfikacja

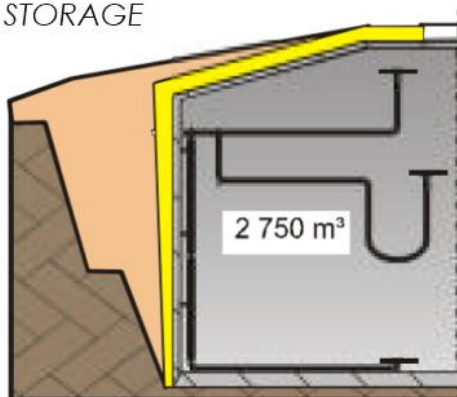
zbiornika (Bespalko i in., 2018). Izolację magazynu zapewnia szkło piankowe w workach z geomembrany, które wyjątkowo szybko schnie i jest proste w instalacji (Rad i Fung, 2016).

Magazyn znajduje się częściowo pod ziemią, a jego naziemna część wznosi się ok. 4,5 m nad powierzchnią terenu. Zbiornik został zagospodarowany przestrzennie – jego jedna ściana została przekształcona w ściankę wspinaczkową dla dzieci, natomiast reszta zbiornika obsypana jest ziemią i pokryta roślinnością (Rysunek 72) (Rumming, 2004).



**Rysunek 70 Lokalizacja magazynu ciepła TTES w Hannover**

HANNOVER  
TANK THERMAL ENERGY  
STORAGE



**Rysunek 71 Konstrukcja magazynu ciepła TTES w Hannover (Bespalko i in., 2018)**



**Rysunek 72** Magazyn ciepła TTES w Hannover, obsypany i wykorzystany jako część placu zabaw (<https://spielplatznet.de/spielplatz/260/Hannover/Kletterspielplatz>)

### **4.3.2. Wybrane doświadczenia krajowe**

#### **4.3.2.1. Lidzbark Warmiński – Ciepłownia Przyszłości**

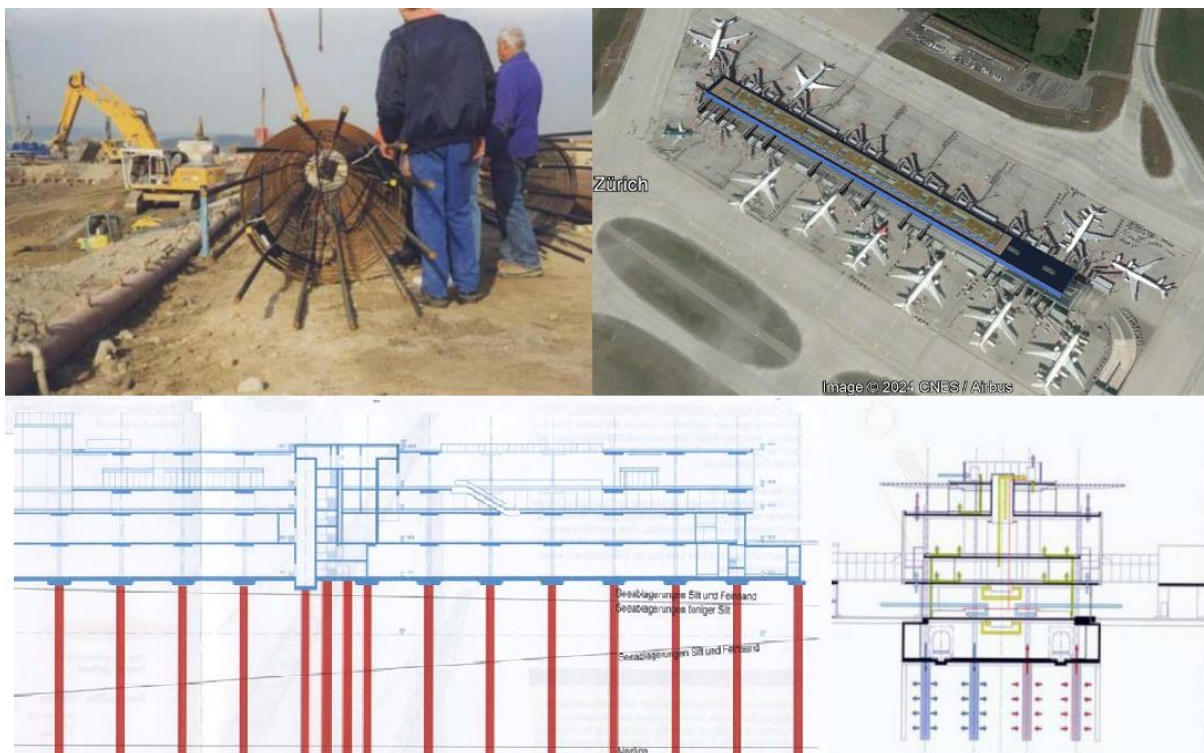
Naziemne zbiorniki typu TTES funkcjonują w kraju od lat, głównie jako dobowe/krótkoterminowe magazyny przy dużych elektrociepłowniach (np. EC Siekierki, EC Kraków, EC Białystok, EC Bielsko-Biała). Podziemny magazyn typu TTES wykonany został w ramach Ciepłowni Przyszłości w Lidzbarku Warmińskim. Został on szczegółowo opisany w rozdziale 4.1.2.1.

## **4.4. Fundamenty energetyczne – EF(TG)**

### **4.4.1. Wybrane doświadczenia zagraniczne**

#### **4.4.1.1. Zürich, Szwajcaria**

Terminal Dock Midfield na lotnisku w Zürichu (Szwajcaria) posadowiony jest na 440 palach fundamentowych, które umożliwiają przenoszenie obciążeń budynku na grunt. Zostały one zastosowane, ponieważ górna warstwa gruntu zbudowana z osadów jeziornych jest zbyt miękka, by samodzielnie przenosić obciążenia konstrukcji. Pale sięgają do warstwy moreny glacialnej, znajdującej się na głębokości około 30 metrów. Ponad 300 pali zostało przekształconych w elementy termoaktywne, które zapewniają grzanie oraz chłodzenie budynku (Rysunek 73). Pierwsze pomiary wydajności systemu miały miejsce w latach 2004-2006.



**Rysunek 73 Montaż termopali, Terminal Dock Midfield (CFMS i in., 2017)**

Szczegóły dotyczące instalacji znajdują się w tabeli (Tabela 21).

**Tabela 21 Parametry EF(TG) w Zürichu w Szwajcarii**

Termopale			
Liczba pali termoaktywnych	306	Minimalna temperatura czynnika roboczego [°]	2,4
Średnica pali [m]	od 0,9 do 1,5	Średnia temperatura na wylocie czynnika roboczego [°]	17
Średnia długość pala [m]	26,8	Średnia temperatura gruntu [°]	11
Średnia odległość pomiędzy palami [m]	9	Średnia przewodność cieplna gruntu [W/(m*K)]	1,8
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Średnia pojemność cieplna gruntu [MJ/(m <sup>3</sup> *K)]	2200
Powierzchnia ogrzewania [m <sup>2</sup> ]	85 200	Objętość gruntu objęta oddziaływaniem termicznym [m <sup>3</sup> ]	660 000
Energia ładowania magazynu [MWh]	620	Technologia źródła energii	Ciepło odpadowe z klimatyzatorów

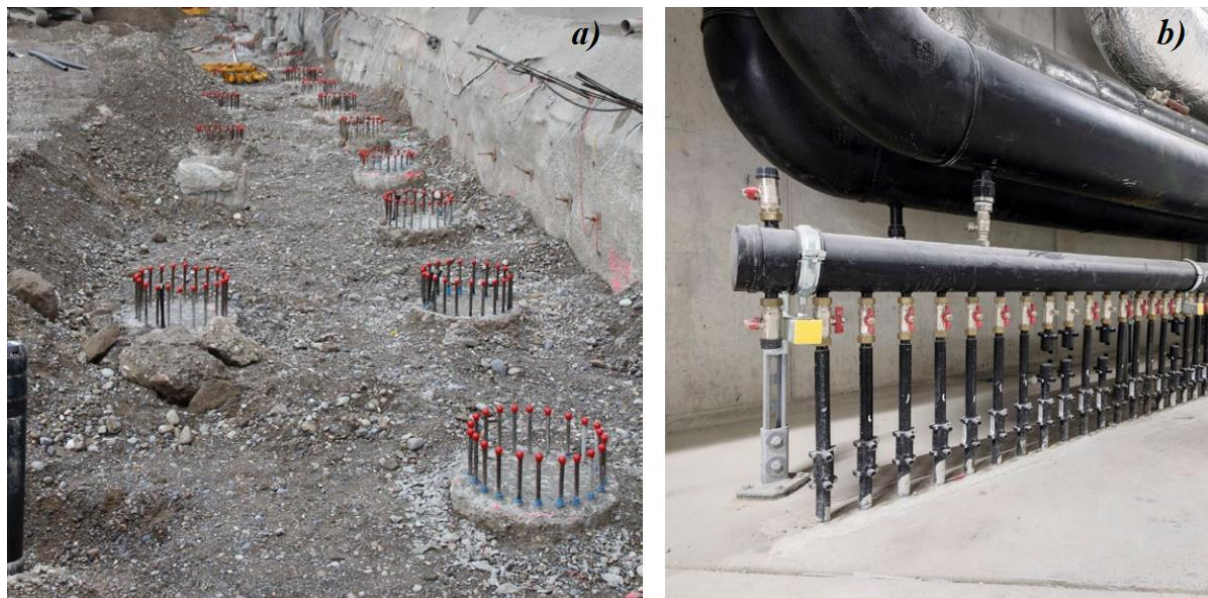
Podłoże pod budynkiem zostało rozpoznane w dwóch 33 metrowych wierceniach. Są to głównie osady ilaste genezy jeziornej. Na podstawie testów TRT określono średnią przewodność termiczną podłoża na ok. 1,8 W/(m\*K).

Każdy z 306 pali został doposażony w 5 U-rurek przymocowanych do metalowego zbrojenia pala. Termopale współpracują z pompami ciepła w trybie grzania i chłodzenia, które zapewniają również minimalną temperaturę czynnika roboczego, w celu uniknięcia spadku poniżej 0°C (Pahud i Hubbuch, 2007). Magazyn ładowany jest ciepłem odpadowym z klimatyzatorów.

Przeprowadzono pomiary temperatury czynnika roboczego w 15 miejscach oraz 15 pomiarów temperatury gruntu na czterech palach, które nie posiadają konstrukcji termoaktywnej. Szczegółowy monitoring prowadzony jest również na pompach ciepła.

Bilans energetyczny systemu, a w szczególności roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia są zbliżone do wartości ustalonych w fazie projektowej. Ponadto wydajność cieplna systemu jest bardzo dobra.

W 2020 roku na terenie lotniska otworzono nowe centrum biznesowe („The Circle”), które wybudowane zostało z wykorzystaniem 1150 pali, z czego 850 jest aktywnych termicznie (Rysunek 74). Dzięki magazynowaniu energii cieplnej budynek jest prawie samowystarczalny w kwestii dostaw ciepła i klimatyzacji. W centrum zastosowane są systemy budynków aktywnych termicznie, sama masa betonowa w konstrukcji budynku służy do magazynowania energii cieplnej.



**Rysunek 74 a) Pale energetyczne w centrum biznesowym „The Circle” na terenie lotniska, b) rozdzielacz instalacji geotermalnej (LEED, 2022)**

#### 4.4.1.2. Stuttgart-Fasenhof, Niemcy

Tunel metra Stuttgart–Fasanhof wyposażony jest w termoaktywną konstrukcję, która pozwala na pobór i wykorzystanie energii w celach grzania i chłodzenia. Wymienniki ciepła zamocowane są meandrycznie pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną okładziną tunelu na szynach mocujących (Rysunek 75). Czynnikiem roboczym jest mieszanina wody z glikolem etylenowym (Berg i in., 2017). Elementy geotermalne zostały zainstalowane w 2011 roku.

Szczegóły dotyczące instalacji znajdują się w tabeli (Tabela 22).

**Tabela 22 Parametry EF(TG) w Stuttgart–Fasanhof w Niemczech**

Tunel energetyczny			
Długość tunelu [m]	380	Srednica wymienników [mm]	25
Wysokość tunelu [m]	9,2	Długość wymienników [m]	800
Szerokość tunelu [m]	7,4	Powierzchnia wyposażona w wymienniki [m <sup>2</sup> ]	360
Pompy ciepła w układzie [Tak/Nie]	Tak	Obszar aktywny termicznie	2 odcinki tunelu o długości 10 m każdy

Transport ciepła w podłożu zachodzi przede wszystkim przez proces przewodzenia między wodą a górotworem. Tunel umiejscowiony jest w wapieniach, piaskowcach oraz marglach. W warstwie piaskowca występuje warstwa wodonośna, jednak w strefie tunelu nie natrafiono na przepływ wód podziemnych. Podczas prac pobrano próbki skał do termicznych badań laboratoryjnych. Przewodność termiczna wapieni i margli okazała się zbliżona (około 2 W/(m\*K) w stanie suchym) natomiast badane piaskowce charakteryzowały się wyższym parametrem: około 3,5 W/(m\*K). Wykonano także dwa badania TRT, które wykazały średnią przewodność termiczną górotworu ok. 1,9 W/(m\*K) (Buhmann i in., 2016).

W tunelu aktywowano termicznie dwa oddzielne bloki o całkowitej długości 20 m (Rysunek 76). Odległość między blokami to około 80 m i wynika z zamiaru analizy badawczej różnych warunków

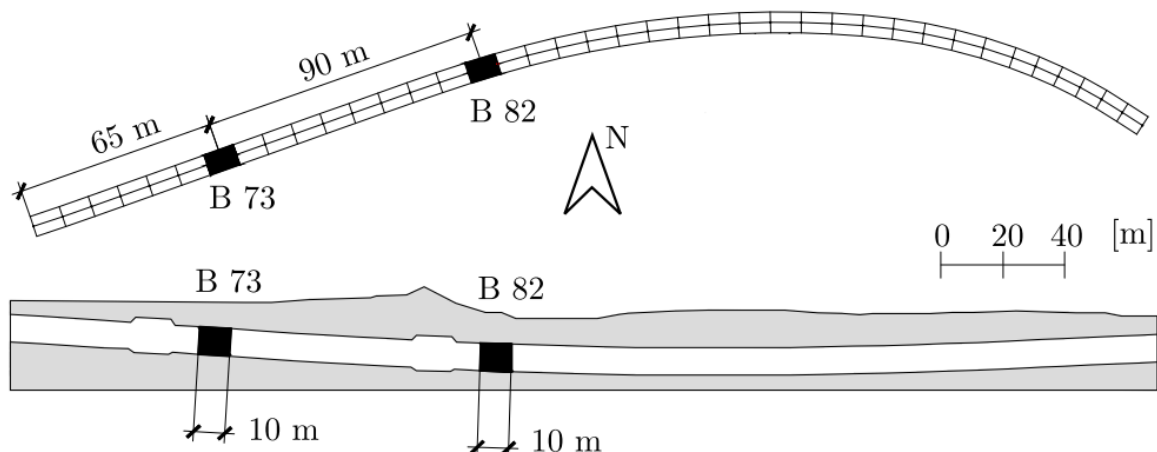
geologicznych. Wymienniki zbudowane są z wysokociśnieniowych rur polietylenowych i połączone są do głównego przewodu biegnącego po dnie tunelu. Przewód ten połączony jest z pompą ciepła na stacji metra. Energia pobierana z instalacji wykorzystywana jest na stacji do klimatyzacji.

Tunel wyposażony jest w zaawansowane urządzenia pomiarowe, zbierające dane o temperaturze podłoża, okładzin tunelu i powietrza. 6 czujników o długości od 5 do 10 metrów dokonuje pomiarów temperatury podłoża w 56 punktach, przy pomocy czujników PT-100.

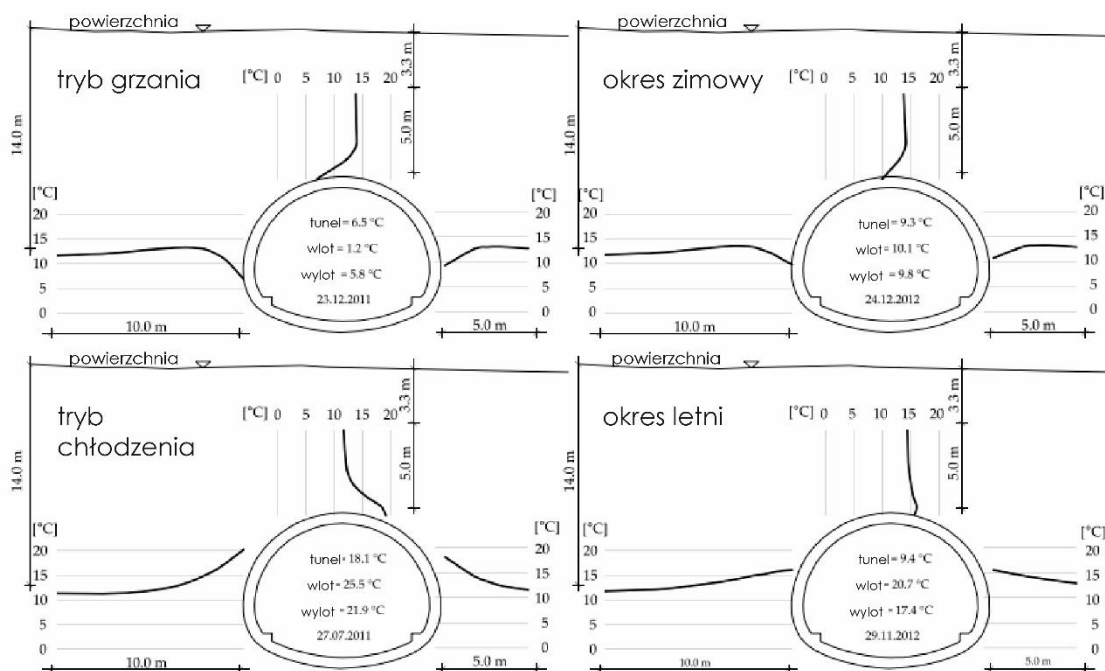
Grafika (Rysunek 77) w lewym górnym rogu przedstawia temperatury gruntu wynikające z pracy instalacji w trybie ogrzewania w 2011 roku. Temperatura w pobliżu zewnętrznej powierzchni tunelu odpowiada temperaturze powietrza w tunelu ( $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), natomiast wpływ niskiej temperatury zasilania obiegu pierwotnego ( $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) jest niewielki. Grafika w prawym górnym rogu ukazuje wpływ temperatury gruntu wynikający wyłącznie z antropogenicznego strumienia ciepła z wnętrza tunelu, bez działania instalacji geotermalnej. Wartości temperatur na wejściu i wyjściu są zbliżone (ok.  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), co potwierdza brak aktywnej wymiany ciepła. Grafika w lewym dolnym rogu pokazuje wpływ pracy instalacji w trybie chłodzenia. W tym przypadku gorący czynnik ( $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) oddaje ciepło do ścian tunelu, co prowadzi do wzrostu temperatury gruntu przy powierzchni zewnętrznej tunelu o około  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ostatnia grafika (prawy dolny róg) przedstawia stan temperatur gruntu po dłuższym okresie chłodzenia w 2012 roku. Temperatura powietrza w tunelu spadła do  $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura gruntu w pobliżu tunelu była zbliżona do temperatury wody na wyjściu z obiegu pierwotnego ( $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Buhmann i in., 2016).



**Rysunek 75 Rury absorbujące do przesyłu energii geotermalnej (Schneider i Moormann, 2010)**



**Rysunek 76 Umiejscowienie aktywowanych termicznie fragmentów tunelu (Buhmann i in., 2016)**



**Rysunek 77 Pomiary temperatury układu w różnych trybach działania (Buhmann i in., 2016)**

#### 4.4.1.3. Bregencja, Austria

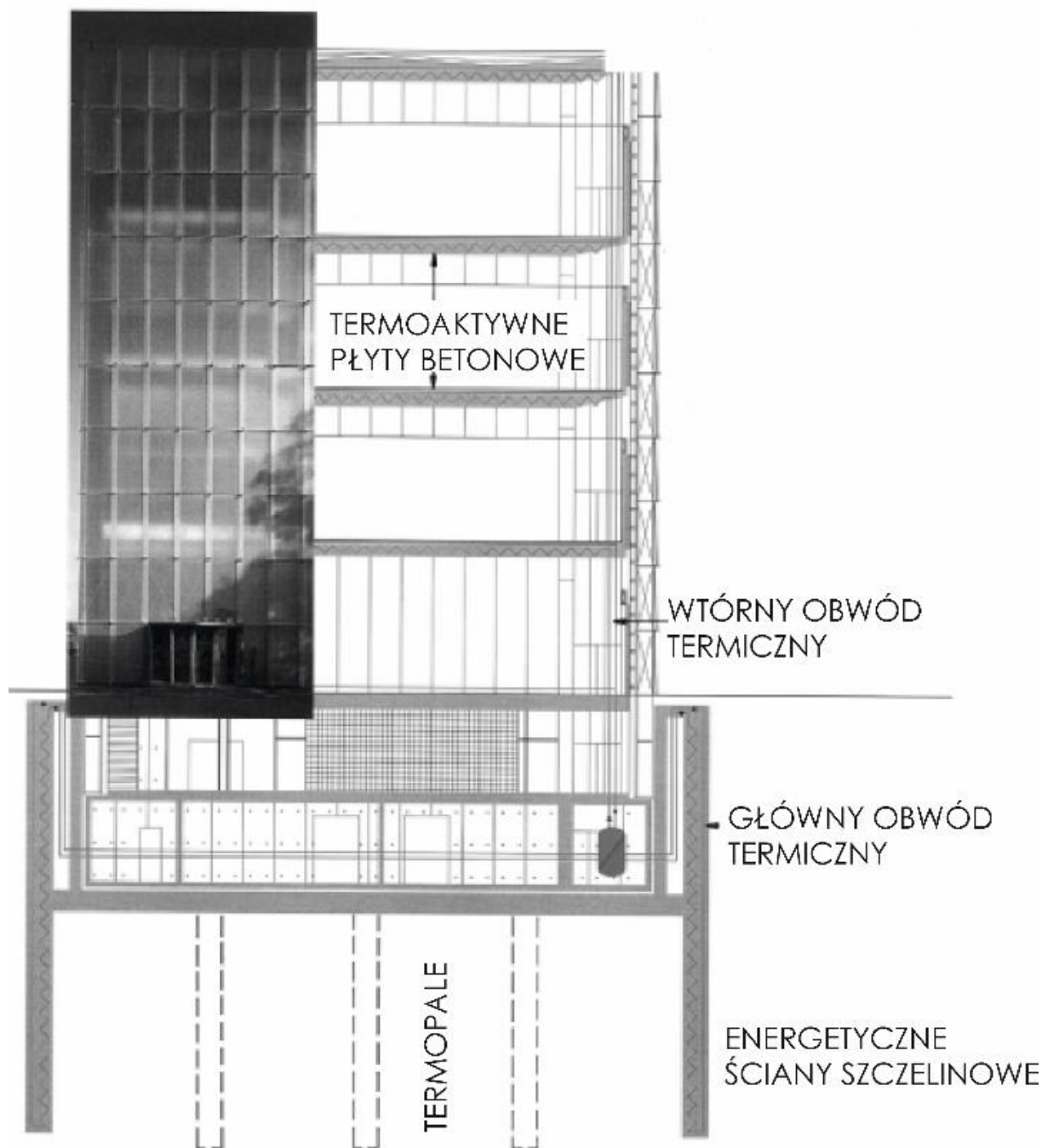
Centrum sztuki współczesnej Kunsthaus w Bregencji jest ośrodkiem korzystającym z technologii pali energetycznych jak i termoaktywnych ścian szczelinowych. Budynek posiada objętość 28000 m<sup>3</sup> i powierzchnię 33500 m<sup>2</sup>. Fundamenty, wymagające wykonania 11 metrowego wykopu, składają się ze ścian szczelinowych o grubościach od 0,5 do 1,2 metra i głębokości do 28 metrów, oraz pali do głębokości 25 metrów (Rysunek 78).

Profil geologiczny w miejscu galerii zaczyna się 3,5 metrową warstwą żwiru leżącego na piaskach luźnych oraz ilach, sięgających 21 m pod powierzchnią terenu. Utwory te leżą na osadach morenowych, pod którymi znajduje się podłoże skalne. Poziom wód podziemnych został rozpoznany na głębokości 1 m p.p.t. Ściany szczelinowe izolują warstwę wodonośną od reszty konstrukcji.

Konstrukcje betonowe budynku (podłogi, sufity, ściany) zawierają pętle wymienników ciepła. Energia cieplna pobierana jest z systemu absorberów betonowych zintegrowanych ze ścianami szczelinowymi, które pełnią funkcję konstrukcji oporowej dla wykopu oraz fundamentu. Szereg wymienników

polietylenowych podłączony jest do obiegów zasilania i powrotu przy ścianach szczelinowych. Jednostki przewodzące zostały zamontowane w pętlach do konstrukcji zbrojonej ścian przed ich zabetonowaniem. Czynnikiem roboczym krążącym w wymiennikach jest woda (Brandl, 2006).

Fundamenty energetyczne zapewniają ogrzewanie jak i klimatyzację budynku, w zależności od sezonu. Budynek został zaprojektowany w taki sposób, aby do pomieszczeń wpadała jak największa ilość światła dziennego. Ciepło promieniowania słonecznego padające na betonowe elementy budynku zawierające wymienniki, podgrzewa bezpośrednio czynnik roboczy, który przenosi je do ścian szczelinowych (które to ciepło magazynują).



**Rysunek 78** Konstrukcja centrum sztuki współczesnej w Bregencji, posadowionego na termopalach, korzystającego z technologii energetycznych ścian szczelinowych (Brandl, 2006)

Szczegóły dotyczące instalacji znajdują się w tabeli (Tabela 23).

**Tabela 23 Parametry EF(TG) w Bregencji w Austrii**

Termopale i ściany szczelinowe			
Grubość ścian szczelinowych [m]	0,5; 0,9 i 1,2	Głębokość posadowienia termopali [m]	17 -25
Głębokość posadowienia ścian szczelinowych [m]	do 28	Łączna długość wymienników w budynku [m]	24 000
Głębokość pali energetycznych [m]	17 - 25	Maksymalna moc chłodnicza	120 kW
Średnica termopali [m]	1,2	Czynnik roboczy w wymiennikach	woda
Powierzchnia ścian szczelinowych aktywowanych termicznie [m <sup>2</sup> ]	45000	Dodatkowe źródła energii	Światło słoneczne padające bezpośrednio na betonowe elementy budynku zawierające wymienniki

#### 4.4.2. Wybrane doświadczenia krajowe

##### 4.4.2.1. Kraków – Archiwum Narodowe

System grzewczo-chłodniczy w nowej siedzibie Archiwum Narodowego w Krakowie obejmuje źródła ciepła i chłodu dla budynku w oparciu o:

- pale aktywne (termopale) i sondy gruntowe jako dolne źródło,
- pompy ciepła solanka-woda jako podstawowe źródło ciepła i chłodu,
- powietrzne pompy ciepła jako rezerwa dla pomp gruntowych głównie w zakresie przygotowania chłodu,
- odzysk ciepła z suchych chłodziaczy cieczy, pracujących na potrzeby klimatyzacji serwerowni (praca ciągła całoroczna),
- przygotowanie ciepłej wody użytkowej w oparciu o odzysk ciepła, z dogrzewaniem gruntem lub powietrzną pompą ciepła.

System chłodzenia obiektu opiera się na zastosowaniu technologii pasywnego i aktywnego chłodzenia. Chłodzenie pasywne (chłodzenie naturalne, sprężarki pomp ciepła nie pracują) – wykorzystanie naturalnego chłodu znajdującego się w instalacji dolnego źródła. Chłód przekazywany poprzez wymiennik płytowy WP1 do zasobnika buforowego chłodu.

Chłodzenie aktywne (sprężarki pomp ciepła pracują):

- Pierwszy stopień - kaskada trzech pomp ciepła firmy Viessmann serii Vitocal 300 G:
  - Pompa ciepła nr 1 Vitocal 300 G BW 301.A45-lub urządzenie równorzędne
  - Pompa ciepła nr 2 Vitocal 300 G BWS 301.A45-lub urządzenie równorzędne
  - Pompa ciepła nr 1a Vitocal 300 G BW 301.A45-lub urządzenie równorzędne
 Ciepło wytworzone przez pompy ciepła przekazywane jest do zasobnika buforowego a następnie, jeżeli występuje zapotrzebowanie na energię w obiekcie, energia jest przekazywana do obiektu poprzez pompy obwodów grzewczych. Nadmiar ciepła zrzucany jest do dolnego źródła poprzez wymiennik pośredni i pompę obiegową
- Drugi stopień - kaskada dwóch rewersyjnych pomp ciepła powietrze/woda AWO 301.A60 firmy Viessmann. Przy zwiększonym zapotrzebowaniu na chłód w układzie bezpośrednim rewersyjne pompy ciepła AWO 301.A60 będą dostarczały wodę lodową do zasobników buforowych chłodu równolegle z zespołem stopnia pierwszego chłodzenia aktywnego.

Moc chłodnicza jednej jednostki AWO 301.A60 to 54,5 kW. Druga jednostka AWO 301.A60 stanowi zabezpieczenie mocy chłodniczej dla pierwszego i drugiego stopnia chłodzenia.

Instalacja z termopali podzielona jest na 39 obwodów (3 rozdzielacze po 10 obwodów, jeden rozdzielacz dziewięcioobwodowy), w każdym obwodzie połączone zostały 3 pale aktywne.

Zaprojektowano przewody PE-Xa SDR11 o średnicy 20×1,9 mm wykonane z wysokociśnieniowo sieciowanego polietylenu według PN-EN ISO 15875. Żywotność rur wg DIN 16892/93 wynosi 100 lat przy temperaturze 20 °C i maksymalnym ciśnieniu roboczym 15 bar. Dopuszczalny zakres stosowanych temperatur medium od -40 °C do +95°C. Przewody cechują się dużą elastycznością i odpornością na zginanie oraz odporne są na promieniowanie UV.

Automatyka sterowników pomp ciepła i pomp obiegowych dolnego źródła realizuje następujące funkcje:

- tryby pracy grzanie, AC/NC w całości sterowane ze sterowników pomp ciepła,
- urządzenia pracują w kaskadzie - pompy gruntowe i pompy powietrzne,
- pompa gruntowa ma ustawiony priorytet przygotowania c.w.u. w czasie, gdy produkuje ciepło,
- pompa powietrzna ma priorytet przygotowania c.w.u. (ciepła woda użytkowa),
- ustalenie trybu pracy pomp ciepła (grzanie/chłodzenie) następuje po otrzymaniu sygnału z systemu BMS (ang. Building Automatic Systems – System Zarządzania Budynkiem),
- zapotrzebowanie na ciepło: włączanie kaskadowe pomp ciepła, w pierwszej kolejności pomp gruntowych i pompy obiegowej P3, a następnie pomp powietrznych,
- przełączenie przygotowania c.w.u. na pompę powietrzną następuje gdy w układzie produkowany jest chłód,
- przełączenie pracy pomp powietrznych z ogrzewania na chłodzenie,
- wysyłanie ze wszystkich urządzeń do systemu BMS sygnału o pracy i awarii.

Szczegóły dotyczące instalacji zostały przedstawione w tabeli (Tabela 24).

**Tabela 24 Parametry termopali w nowej siedzibie Archiwum Narodowego w Krakowie**

EF(TG) w Archiwum Narodowym w Krakowie			
Rozpoczęcie eksploatacji	2021	Całkowity przepływ nośnika ciepła przez gruntowe pompy ciepła po stronie źródła dolnego	22,75 m <sup>3</sup> /h
Całkowite obciążenie cieplne dla obu budynków, Q <sub>ogrz</sub>	101,2 k	Przepływ przez jedną pompę ciepła	7,58 m <sup>3</sup> /h
Zapotrzebowanie chłodu dla obu budynków, Q <sub>chl</sub>	145,9 kW	Opór przepływu przez pompę ciepła po stronie dolnego źródła (wg charakterystyki pompy ciepła) ΔP <sub>pd</sub>	34 kPa
Liczba pomp ciepła w kaskadzie o mocy 128,4 kW	3 szt.	COP 2 pompy ciepła w kaskadzie: wiodąca i nadążna (Vitocal 300 G BW 301.A45) S0/W35 ΔT=5 K	4,61
Liczba termopali dolnego źródła o długości 10 m każdy	117 szt.	COP 1 pompy ciepła w kaskadzie: wiodąca dla c.w.u. (Vitocal 300 G BW 301.A45) S2/W55 ΔT=5 K	2,81
Liczba otworowych wymienników ciepła PE-RC 40×3,7 mm o głębokości 100 m każdy i odległości 10 m	12 szt.	Rezerwowe źródło ciepła c.o. i c.w.u. – kaskada dwóch powietrznych rewersyjnych dwustopniowych pomp ciepła	2×AWO 301.A60 firmy Viessmann
Nośnik ciepła dolnego źródła	29% glikol etyl	Moc ciągłego odzysku ciepła z serwerowni	60 kW
Zakładany strumień ciepła, pozyskiwany z pali aktywnych (termopali) przy ΔT=4°C	52,7 kW	Moc ciągłego odzysku ciepła z zapasowego repozytorium cyfrowego	50 kW
Głębokość termopali (zapuszczenia U-rurek)	10 m	Parametr instalacji chłodniczej dla klimatyzacji (chłodzenie wodą urządzeń klimatyzacyjnych w pomieszczeniach)	45/50°C
Całkowity przepływ dla instalacji pali aktywnych	11,9 m <sup>3</sup> /h	Wymagane ciśnienie dla instalacji dolnego źródła (rury wymienników, termopale, orurowanie), Δp	63,6 kPa
Maksymalna strata ciśnienia w termopalach	25,85kPa	Opór wymienników po stronie dolnego źródła, Δp	13,8 kPa
Pojemność instalacji termopali	1,3 m <sup>3</sup>	Całkowita pojemność instalacji dolnego źródła	4700 dm <sup>3</sup>

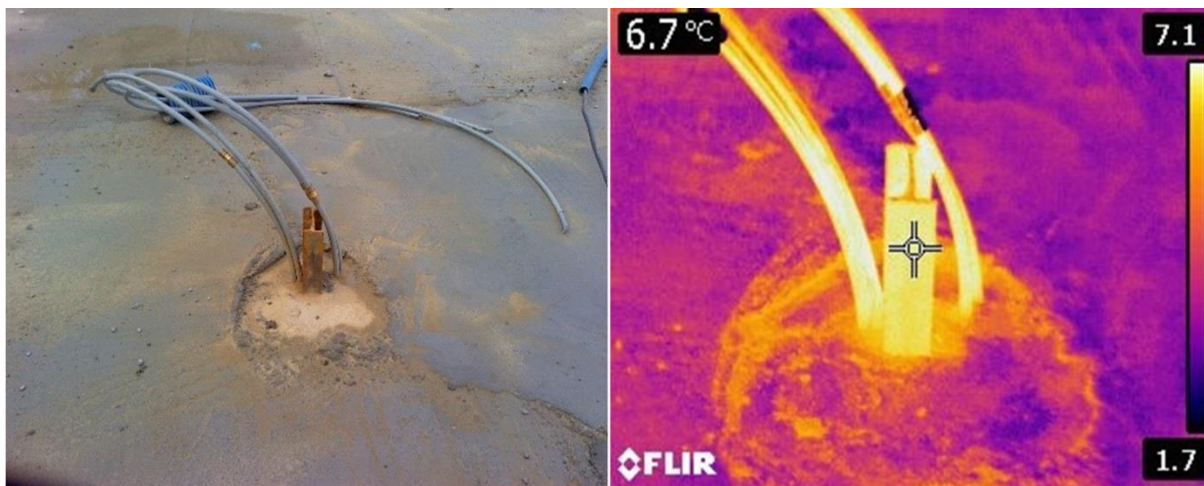
Dla termopali opracowano specjalną konstrukcję, która połączyła zbrojenie nośne pala fundamentowego i rurki cyrkulacyjne nośnika ciepła (Rysunek 79). Zastosowano rurki typu Rauego DN 20×1,9 mm wykonane z PE-Xa (Rysunek 80). Na każdej konstrukcji zbrojenia obustronnie zamontowano po jednej U-rurce, stąd 2 U-rurki na pojedynczy termopal (Rysunek 81).



**Rysunek 79 Zbrojenie pali w formie dwu-teownika wraz z umieszczoną U-rurką wymiennika ciepła z zachowaniem minimalnego promienia gięcia rur PE-Xa (Laboratorium Energetyki, AGH)**

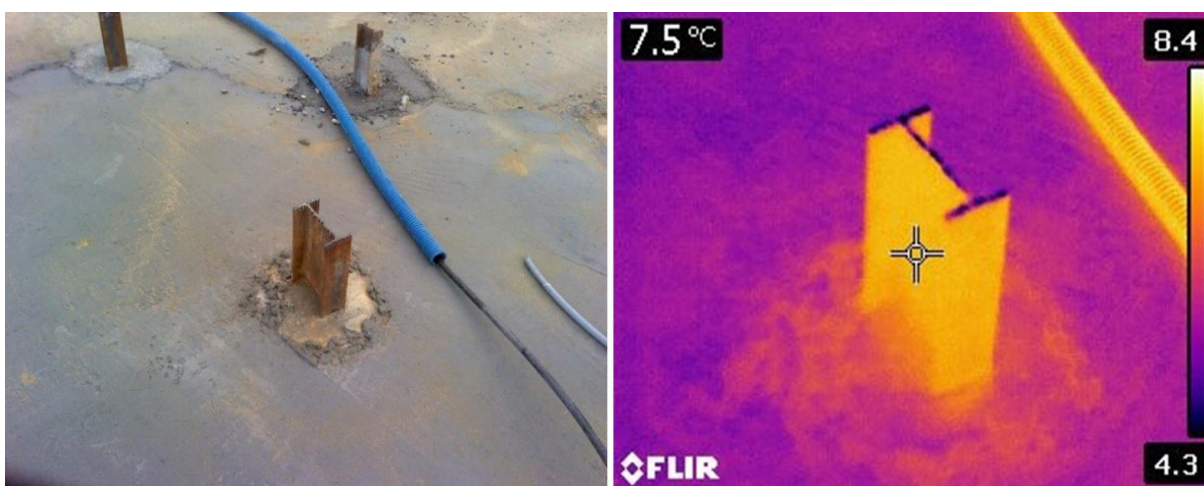


**Rysunek 80 Rurki wymiennika ciepła zamontowane w termopalach (Laboratorium Energetyki, AGH)**

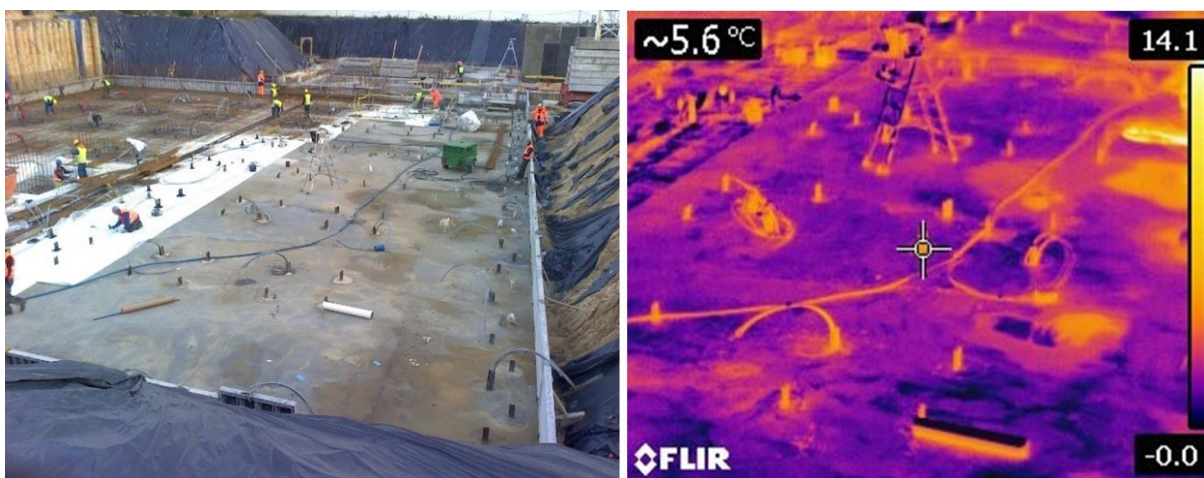


**Rysunek 81 Widok gotowego termopala z podwójną U-rurką (a) oraz jego zbliżenie wykonane w termowizji z wykorzystaniem kamery Flir (b), widoczny obrys pala i rurki polietylenowe o podwyższonej temperaturze (Laboratorium Energetyki, AGH)**

Na rysunku (Rysunek 82) widoczne zbrojenie pojedynczego pala bez układu wymiany ciepła i oddziaływanie termiczne jego zbrojenia. Teren realizacji pali nośnych i termopali ukazuje Rysunek 83.



**Rysunek 82 Zwykły pal (a) i jego zbliżenie (b) z ogrzewanym ciepłem Ziemi zbrojeniem (b) oraz zimą powierzchnią czołową dwu-teownnika (Laboratorium Energetyki, AGH)**



**Rysunek 83 Teren realizacji pośredniego posadowienia (z uwagi na niską nośność podłoża) przy zastosowaniu zwykłych pali i termopali (Laboratorium Energetyki, AGH)**

Na rysunku (Rysunek 84) pokazano świeżo wykonane termopale z zastosowaniem wiertnicy do wierceń okrężnych ze świdrem ślimakowym (Rysunek 85). Z dna wykopu, w którym przeprowadzano proces fundamentowania, wykonano TRT w termopalach (Rysunek 86).



**Rysunek 84 Świeżo wykonane termopale (Laboratorium Energetyki, AGH)**



**Rysunek 85 Wiertnica ślimakowa do wykonywania otworów dla pali nośnych podczas prac na ul. Rakowickiej 22E dnia 10 października 2017 r (Laboratorium Energetyki, AGH)**



**Rysunek 86 Zestaw pomiarowy Laboratorium Geoenergetyki dostarczony na dno terenu fundamentowania z wykorzystaniem dźwigu, celem wykonania testu reakcji termicznej termopala (Laboratorium Energetyki, AGH)**

## **5. Uwarunkowania prawne dotyczące magazynów ciepła (stan na 30.09.2024)**

Uwarunkowania prawne dotyczące magazynów ciepła zostały szczegółowo opisane w opracowaniu „Aspekty formalno-prawne budowy i eksploatacji podziemnych magazynów energii cieplnej” (zwanego dalej „opracowaniem prawnym”; WKB, PIG-PIB 2024) wykonanego w ramach zadań państwowej służby geologicznej „Wstępna ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w poziomach wodonośnych na obszarze Polski (ATES)” oraz „Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF(TG)) w wybranych lokalizacjach na terenie Polski”.

W opracowaniu zidentyfikowano obowiązujące obecnie regulacje prawne (unijne i krajowe) dla magazynów ciepła typu BTES, PTES, TTES oraz ATES. Dla magazynowania ciepła w technologii fundamentów energetycznych i geotechnicznych konstrukcji termicznych - jako elementów konstrukcji budowlanej – wskazano, że regulacje prawne dla takiego magazynu uzależnione będą od wymagań prawnych dla całości zamierzenia inwestycyjnego.

### **5.1. Podziemne magazynowanie ciepła w prawodawstwie**

Obecnie brak jest regulacji, które wprost i kompleksowo odnoszą się do inwestycji związanych z podziemnym magazynowaniem ciepła w systemach zamkniętych. W opracowaniu prawnym dokonano analizy poszczególnych przepisów, które obecnie mają zastosowanie w tego typu instalacjach. Omówione przepisy mające zastosowanie do wszystkich technologii podziemnego magazynowania ciepła to:

- **Dyrektywy**
  - Dyrektywa 2011/92/UE w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko,

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r.,
  - Dyrektywa 2000/60/WE ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej,
  - Dyrektywa 2006/118/WE w sprawie ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniem i pogorszeniem ich stanu,
  - Dyrektywa 2020/2184 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi
  - Dyrektywa 2004/35/WE w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu,
- **Ustawy krajowe**
- Ustawa o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (dalej: Ustawa OOS),
  - Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym,
  - Ustawa Prawo geologiczne i górnicze (dalej: PGG),
  - Ustawa Prawo wodne,
  - Ustawa Prawo budowlane (dalej: PB),
  - Ustawa Prawo energetyczne,
  - Ustawa Prawo ochrony środowiska,
  - Ustawa o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie,
  - Ustawa o odnawialnych źródłach energii.

## **5.2. Procedury prawno-administracyjne**

Do poszczególnych technologii magazynów ciepła w systemach zamkniętych przedstawiono procedury prawno-administracyjne, zgodne z obowiązującymi przepisami. Obejmują one etap lokalizacji i budowy, eksploatacji oraz likwidacji i rewitalizacji.

### **5.2.1. Otworowe magazyny ciepła - BTES**

#### **– Etap lokalizacji i budowy**

W pierwszej kolejności konieczne jest zidentyfikowanie, czy na obszarze planowanej inwestycji obowiązuje plan miejscowy, którego zapisy umożliwiają realizację planowanej inwestycji. W przypadku kiedy:

- plan miejscowy dopuszcza realizację magazynu energii cieplnej – procedura planowania przestrzennego kończy się na tym etapie;
- plan miejscowy zakazuje lub nie dopuszcza takiej inwestycji – inwestor musi wystąpić o zmianę planu miejscowego, co jest procesem długotrwałym;
- brak planu miejscowego – sposób zagospodarowania terenu i warunki zabudowy ustala się w drodze decyzji o warunkach zabudowy;
- inwestycja jest inwestycją celu publicznego – wymagana jest decyzja o lokalizacji inwestycji celu publicznego.

Prace zmierzające do wykonania podziemnego magazynu ciepła BTES są robotą geologiczną w rozumieniu art. 6 ust. 11 PGG. Wykonanie systemu BTES wiąże się z wykonaniem wierceń w celu wykorzystania ciepła Ziemi:

- jeśli głębokość planowanych wierceń nie przekracza 30 m, inwestor może je wykonać bez żadnych procedur administracyjnych,

- przy wierceniach głębszych niż 30 m w celu wykorzystania ciepła Ziemi, należy sporządzić projekt robót geologicznych, który należy zgłosić staroście. Projekt robót geologicznych sporządza uprawniony geolog zgodnie z wymogami zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych. Na podstawie wyników robót, uprawniony geolog sporządza dokumentację geologiczną inną, którą należy przedłożyć staroście w ciągu 6 miesięcy od zakończenia robót (wymagania dla dokumentacji geologicznej innej określono w § 6 Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie innych dokumentacji geologicznych),
- jeżeli odwierty są głębsze niż 100 m, do robót geologicznych stosuje się odpowiednio przepisy dotyczące zakładu górniczego i jego ruchu oraz ratownictwa górniczego (art. 86 PGG), przed przystąpieniem do robót geologicznych sporządzić należy plan ruchu zakładu górniczego, który wraz z opinią wójta (burmistrza, prezydenta miasta) przedkładany jest Dyrektorowi Okręgowego Urzędu Górniczego celem zatwierdzenia w drodze decyzji.

Przepisy Prawa budowlanego dotyczą realizacji systemu BTES jedynie w sytuacji, gdy realizacji podziemnego otworowego magazynu ciepła towarzyszyć będzie stworzenie jakiegokolwiek obiektu budowlanego, zakres stosowania PB w takim przypadku zależeć będzie od rodzaju tego obiektu i nie wiąże się bezpośrednio z samym systemem BTES.

W przypadku procedur energetycznych, podziemne magazyny ciepła typu BTES nie spełniają kryteriów definicyjnych instalacji odbiorczej, nie ma więc szczegółowych wymogów ani procedury przyłączenia ich do sieci. Jednocześnie przedsiębiorstwa energetyczne zajmujące się przesyłaniem lub dystrybucją energii mają publicznoprawny obowiązek zapewnienia przyłączenia do sieci wszystkim podmiotom ubiegającym się o takie przyłączenie, o ile istnieją techniczne i ekonomiczne możliwości. Podmiot ubiegający się o przyłączenie magazynu do sieci powinien złożyć wniosek o wydanie warunków przyłączenia magazynu i jeżeli warunki techniczne i przesłanki ekonomiczne zostaną zweryfikowane pozytywnie, przedsiębiorstwo określa i wydaje warunki przyłączenia.

#### – **Etap eksploatacji**

Eksploatacja systemu BTES nie podlega w obecnym stanie prawnym żadnym procedurom prawnoadministracyjnym.

#### – **Etap likwidacji i rewitalizacji**

Likwidacja otworu wiertniczego podlega również rygorowi PGG. Wymaga ona sporządzenia projektu robót geologicznych, a po ich wykonaniu, sporządzenia dokumentacji geologicznej innej (art. 92 pkt 4 PGG). Projekt robót geologicznych podlega zatwierdzeniu w drodze decyzji, zaś dokumentacja jedynie przedłożeniu organowi administracji geologicznej.

### **5.2.2. Magazyny ciepła w specjalnie wykonanych zbiornikach przypowierzchniowych /podziemnych (PTES/TTES)**

#### – **Etap lokalizacji i budowy**

W pierwszej kolejności należy ustalić, czy na terenie planowanej inwestycji obowiązuje plan miejscowy, który pozwala na realizację tej inwestycji. W przypadku kiedy:

- plan miejscowy umożliwia realizację magazynu energii cieplnej - proces planowania przestrzennego kończy się na tym etapie;
- plan miejscowy zabrania lub nie przewiduje takiej inwestycji - inwestor musi złożyć wniosek o zmianę planu miejscowego, co jest procedurą czasochłonną;

- brak jest planu miejscowego - ustalenie sposobu zagospodarowania terenu oraz warunków zabudowy odbywa się poprzez decyzję o warunkach zabudowy;
- w przypadku inwestycji celu publicznego, konieczna jest decyzja o lokalizacji inwestycji celu publicznego.

Dla magazynów ciepła typu PTES i TTES konieczne jest uzyskanie decyzji środowiskowej, jeżeli:

- zabudowa magazynu wraz z towarzyszącą jej infrastrukturą zajmie powierzchnię co najmniej 1 ha,
- zabudowa magazynu wraz z towarzyszącą jej infrastrukturą zajmie powierzchnię co najmniej 0,5 ha na obszarach objętych formami ochrony przyrody lub w ich otulinach.

Pełny wykaz dokumentów, które należy dołączyć do wniosku o wydanie decyzji środowiskowej zawarty jest w art. 74 ust. 1 Ustawy OÖŚ.

Gdy magazyn TTES lub PTES zostanie uznany za obiekt budowlany trzeciej kategorii geotechnicznej (jako obiekt energetyczny) lub drugiej kategorii przy złożonych warunkach gruntowych w miejscu posadowienia, konieczne będzie rozpoznanie tych warunków poprzez wykonanie robót geologicznych na podstawie zatwierzonego projektu oraz sporządzenie i zatwierdzenie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej.

Dokumentację geologiczno- inżynierską, zawierającą wyniki przeprowadzonego rozpoznania, dołącza się do projektu technicznego obiektu, który jest częścią projektu budowlanego. Jeśli nie zidentyfikowano potrzeby wykonania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, do projektu technicznego załącza się geotechniczne warunki posadowienia magazynu określone na podstawie dokumentacji badań podłoża.

Do realizacji budowy magazynu zbiornikowego konieczne jest pozwolenie na budowę, do wniosku należy dołączyć m. in. projekt zagospodarowania działki lub terenu oraz projekt architektoniczno-budowlany (zawierający opinię geotechniczną oraz informację o sposobie posadowienia magazynu), decyzję środowiskową oraz decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu (jeśli była wydana). Szczegółowe wymagania dotyczące wniosku określone zostały w art. 33 ust. 2 PB.

Ze względu na warunki i możliwości techniczne, magazyny energii cieplnej typu TTES i PTES w zdecydowanej większości przypadków będą budowane na potrzeby lokalnych dostawców energii cieplnej i sieci ciepłowniczych. W związku z tym warunki techniczne przyłączenia i procedura przyłączenia stanowić będą wewnętrzną sprawę tych przedsiębiorstw.

#### – **Etap eksploatacji**

By rozpocząć użytkowanie systemu TTES lub PTES, konieczne jest zawiadomienie powiatowego inspektora nadzoru budowlanego o zakończeniu budowy, zgodnie z art. 54 ust. 1 Prawa budowlanego. Sam etap eksploatacji obecnie nie wymaga żadnych działań związanych z procedurami administracyjnymi.

#### – **Etap likwidacji i rewitalizacji**

Jeżeli wysokość konstrukcji nie przekracza 8 metrów, rozbiórkę obiektu można przeprowadzić po dostarczeniu staroście formularza zgłoszenia rozbiórki, bez uzyskiwania decyzji zezwalającej rozbiórkę.

Należy podjąć czynności wskazane w decyzji środowiskowej (o ile decyzja środowiskowa została wydana) oraz w pozwoleniu na budowę.

### 5.2.3. Fundamenty energetyczne, geotechniczne konstrukcje termiczne (EF (TG))

Z uwagi na to, że fundamenty energetyczne są zawsze elementami konstrukcji budowlanej jakiegoś obiektu, wymagania formalno-prawne dla ich realizacji są uzależnione od wymagań dla całego zamierzenia budowlanego. Z tego względu odstąpiono od analizy otoczenia prawnego dla fundamentów energetycznych, bowiem systemy te funkcjonują jedynie w powiązaniu z obiektem budowlanym i muszą być uwzględnione zarówno w projektach technicznych, jak i w procedurach prawno-administracyjnych wymaganych przepisami właściwymi dla tego obiektu.

### 5.3. Identyfikacja luk w zakresie kompleksowej regulacji przepisów w zakresie magazynów ciepła

W opracowaniu prawnym zidentyfikowano niejasności, niezgodności i braki przepisów oraz zaproponowano zmiany legislacyjne w prawie krajowym. Uwagi przedstawiono w podziale na zakresy tematyczne:

#### – Prawo energetyczne:

- brak regulacji w zakresie magazynowania ciepła,
- w definicji magazynu energii brak ujęcia magazynowania ciepła,
- brak definicji magazynu ciepła,
- niewystarczająca definicja ciepła.

Zaproponowano następujące zmiany w art. 3:

- 10ka) magazyn energii – instalacja umożliwiająca magazynowanie energii, w tym magazyn energii elektrycznej oraz magazyn energii cieplnej;
- 59b) magazynowanie energii cieplnej – odroczenie końcowego zużycia ciepła lub chłodu pochodzących z różnych źródeł poprzez ich przechowywanie zakładające następnie wprowadzenie ciepła lub chłodu do instalacji odbiorczej lub sieci ciepłowniczej.
- 10 kb) magazyn energii cieplnej – zbiornikową lub bezzbiornikową instalację w rozumieniu art. 3 pkt. 10 umożliwiającą magazynowanie energii cieplnej w różnych nośnikach dla odroczenia jej wykorzystania w postaci ciepła lub chłodu.
- 2) ciepło i chłód – energię cieplną w powietrzu, wodzie gorącej, gruntach i skałach, parze lub w innych nośnikach, w tym magazynowaną dzięki procesom przemian fazowych, procesom termochemicznym i in.

#### – Ustawa o odnawialnych źródłach energii:

- podziemne magazyny ciepła nie są uwzględnione jako część instalacji OZE,
- nieprecyzyjna definicja energii geotermalnej.

Zaproponowano następujące zmiany w art. 2:

- 13) instalacja odnawialnego źródła energii – instalację stanowiącą wyodrębniony zespół: b) obiektów budowlanych i urządzeń, stanowiących całość techniczno-użytkową służącą do wytwarzania biogazu, biogazu rolniczego, biometanu lub wodoru odnawialnego - a także połączony z tym zespołem magazyn energii elektrycznej, magazyn energii cieplnej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii lub ciepła odpadowego w rozumieniu art. 3 pkt 20i ustawy Prawo energetyczne, magazyn biogazu lub instalacja magazynowa w rozumieniu art. 3 pkt 10a ustawy - Prawo

energetyczne wykorzystywana do magazynowania biogazu rolniczego, biometanu lub wodoru odnawialnego,

- o 10) energia geotermalna – energię ~~o charakterze nieantropogenicznym skumulowaną zgromadzoną~~ w postaci ciepła pod powierzchnią ziemi.

– **Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym:**

- o brak zapisów dotyczących podziemnych magazynów ciepła w kontekście możliwości ich lokalizacji zgodnie z planem miejscowym/planem ogólnym.

Zaproponowano następujące zmiany w art. 61 ust 3.:

- o 2) Przepisów ust. 1 pkt 1-2 nie stosuje się do obiektów liniowych i urządzeń infrastruktury technicznej, **w tym do magazynów energii, o których mowa w art. 3 pkt 10ka\* ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne** (\* w brzmieniu nadanym mu zgodnie z postulatem legislacyjnym zmiany obecnej definicji magazynu energii na gruncie Prawa energetycznego).

Zaproponowano następujące zmiany w art. 27b ust 1.:

- o Do sporządzania i uchwalania planu miejscowego albo jego zmiany dopuszcza się zastosowanie postępowania uproszczonego, jeżeli:
- o plan miejscowy albo jego zmiana dotyczy wyłącznie lokalizacji instalacji odnawialnych źródeł energii innych niż elektrownie wiatrowe w rozumieniu ustawy z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych (Dz. U. z 2024 r. poz. 317) **lub podziemnych magazynów energii cieplnej w rozumieniu art. 3 pkt. 10kb Ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U.2024 poz. 266 ze zm.)\*** (\* w brzmieniu nadanym mu zgodnie z postulatem legislacyjnym wprowadzenia definicji magazynu energii cieplnej na gruncie Prawa energetycznego).

– **Prawo geologiczne i górnicze:**

- o brak zdefiniowania terminu „ciepło Ziemi” i określenia czym są otwory wykonywane w celu wykorzystania ciepła Ziemi,
- o brak definicji podziemnych bezzbiornikowych magazynów energii cieplnej,
- o zbyt szerokie wyłączenie spod regulacji ustawy płytkich wierceń wykonywanych w celu wykorzystania ciepła Ziemi,
- o brak wymogu zatwierdzania dokumentacji geologicznej w przypadku dużych systemów gruntowych pomp ciepła z dolnym źródłem w systemie zamkniętym,
- o stosowanie przepisów dot. ruchu zakładu górniczego dla wierceń głębszych niż 100 m, wykonywanych w celu wykorzystania ciepła Ziemi w systemach zamkniętych, mimo braku uzasadnienia.

Zaproponowano następujące zmiany w art. 6:

- o 5c) **podziemnym bezzbiornikowym magazynem energii cieplnej – jest część górotworu, w której magazynuje się energię cieplną, wraz z instalacją umożliwiającą jej wprowadzanie i odbiór.**
- o 8a) **ciepłem Ziemi – jest zgromadzona w górotworze energia cieplna pochodząca z procesów zachodzących w górotworze i poza nim, także w wyniku działalności człowieka, z wyłączeniem energii wód zaliczanych do kopaliny.**

Zaproponowano następujące zmiany w art. 3:

- wykonywanie wkopów oraz otworów wiertniczych o głębokości do ~~30 m~~ 10 m w celu wykorzystania ciepła Ziemi, poza obszarami górniczymi.

Zaproponowano następujące zmiany w art. 86:

- 86a. Art. 86 nie znajduje zastosowania do robót geologicznych wykonywanych na potrzeby korzystania z ciepła Ziemi w technologii otworowych wymienników ciepła w systemach zamkniętych niewymagających rekonstrukcji i adaptacji istniejących otworów wiertniczych, w tym podziemnego magazynowania energii cieplnej, do głębokości 300 m, poza obszarem górniczym.

– **Prawo budowlane:**

- brak określenia wymagań technicznych dla podziemnych magazynów energii cieplnej.

Koncepcja powinna zostać wypracowana przy współpracy ze specjalistami technicznymi.

– **Inne:**

- brak ewidencji podziemnych magazynów energii cieplnej.

Umieszczenie rejestru w konkretnym akcie prawnym, wskazanie administratora/operatora oraz szczegółowy zakres informacji, które będą gromadzone, powinny być uzgodnione w ramach prac interdyscyplinarnego zespołu złożonego co najmniej z geologów, ciepłowników, instalatorów systemów pomp ciepła i przedstawicieli władz, w tym samorządowych. Rejestr powinien być centralny dla całego kraju i przynajmniej w części publiczny, być może z pewnymi restrykcjami dostępu, ze względu na ochronę danych i interesów właścicieli/operatorów systemów energetycznych opartych lub korzystających z podziemnych magazynów energii cieplnej.

Argumenty podane w opracowaniu prawnym, przemawiające za tym, żeby prowadzenie działalności w zakresie niekoncesjonowanego korzystania z ciepła Ziemi, w tym podziemnego magazynowania ciepła, objęte zostało obowiązkiem rejestrowym to:

- konieczność oceny wpływu na środowisko korzystania z ciepła Ziemi, w tym bezzbiornikowego magazynowania ciepła,
- konieczność monitorowania stref oddziaływań istniejących systemów do celów efektywnego wykorzystania przestrzeni podziemnej (w tym tworzenia nowych systemów) i ograniczenia ryzyka negatywnego wzajemnego oddziaływania,
- konieczność ewidencjonowania infrastruktury podziemnej dla odpowiedzialnego zarządzania górotworem, w tym również jej prawidłowego likwidowania,
- gromadzenie informacji na temat mocy grzewczych i chłodniczych dostępnych zwłaszcza w danym rejonie możliwość monitorowania rozwoju rynku.

## 6. Kryteria do oceny lokalizacji magazynów ciepła

Kryteria oceny lokalizacji stanowią zbiór ilościowych (parametrów) i jakościowych wskaźników, które służą do oceny przydatności lokalizacji na podziemny magazyn ciepła, warunkują możliwość realizacji inwestycji i mogą być wykorzystywane do porównania wszystkich potencjalnych lokalizacji i/lub technologii na takich samych zasadach oraz według takiej samej metodyki w celu wyboru opcji optymalnej.

Kryteria warunkujące wybór lokalizacji obejmują szeroki zakres zagadnień niezbędnych do przeprowadzenia analizy i oceny. Określają przyrodnicze (geologiczne i środowiskowe) oraz techniczno-ekonomiczne uwarunkowania. Dla konkretnej lokalizacji magazynu przyjmuje się odpowiednie kryteria parametryczne w celu oceny przydatności do wybudowania magazynu ciepła.

W celu oceny możliwości lokalizacji magazynów ciepła w systemach zamkniętych opracowano kryteria w nawiązaniu do przepisów obowiązującego prawa, dobrych praktyk związanych z analizą geologiczną, a także z uwzględnieniem potencjalnego wpływu inwestycji na środowisko. Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła wyróżniono następujące kryteria:

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

W rozdziale 7 szczegółowo scharakteryzowano kryteria geologiczne, które mają zastosowanie w procesie oceny przydatności poszczególnych potencjalnych lokalizacji magazynów ciepła.

### 6.1. Administracyjno-prawne kryteria do oceny lokalizacji

Kryteria administracyjno-prawne wskazują w pierwszej kolejności na możliwość wykonania magazynu ciepła na danym terenie (Tabela 25). Wpływają również na potencjalny czas realizacji inwestycji, zakres wymaganych pozwoleń, dokumentów i decyzji.

**Tabela 25 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryteriów administracyjno-prawnych**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji
Spełnienie prawnych wymagań lokalizacji magazynu ciepła	Nie ma przepisów ograniczających, utrudniających i wykluczających
	Istnieją przepisy ograniczające i/lub utrudniające
	Istnieją przepisy wykluczające

Pierwszym etapem w ocenie lokalizacji jest sprawdzenie, czy obszar nie jest objęty przepisami mogącymi wykluczać, ograniczać bądź utrudniać wykonanie instalacji. Należy dokonać przeglądu obowiązujących ram legislacyjnych, uwzględniając prawo geologiczne i górnicze, prawo ochrony środowiska (wymagania dotyczące decyzji środowiskowej), ochronę gleb, prawo budowlane, zagospodarowanie przestrzenne, prawo wodne oraz wszelkie przepisy szczególne mogące mieć wpływ na możliwość wykonania magazynu. Należy również rozpoznać przepisy związane ze stanem prawnym nieruchomości.

Szczegółowy opis obowiązujących rozwiązań prawnych dla poszczególnych systemów znajduje się w raporcie pn. „Identyfikacja aspektów formalno-prawnych budowy i eksploatacji poszczególnych energetycznych systemów opartych na podziemnych magazynach ciepła z zaleceniami zmian legislacyjnych dla realizacji takich inwestycji” (WKB, PIG-PIB 2024).

### 6.2. Geologiczne kryteria do oceny lokalizacji

Kryteria geologiczne odgrywają istotną rolę przy doborze odpowiedniej lokalizacji i odpowiedniego systemu magazynowania energii cieplnej. Uwzględniają one czynniki litologiczne, hydrogeologiczne, hydrologiczne, geologiczno-inżynierskie, geomorfologiczne i termiczne ośrodka gruntowo-skalnego. Dokładne rozpoznanie tych czynników pozwala na oszacowanie potencjalnej wydajności magazynu,

zidentyfikowanie zagrożeń i ograniczeń lokalizacji oraz możliwych komplikacji podczas instalacji, eksploatacji i likwidacji instalacji. Wydzielono następujące kryteria geologiczne:

- jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego,
- urabialność gruntów i skał,
- procentowy udział utworów o niskiej przepuszczalności w profilu litologicznym,
- udział gruntów i skał nawodnionych,
- głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych,
- sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych,
- spadki powierzchni terenu,
- forma geomorfologiczna,
- pojemność cieplna górotworu,
- przewodność termiczna górotworu,
- niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie,
- przydatność podłoża na potrzeby budowy podziemnych magazynów ciepła,
- przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp,
- dostępność złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła,
- stopień rozpoznania terenu.

Kryteria geologiczne zostały szczegółowo opisane w rozdziale 7.

### **6.3. Techniczne kryteria do oceny lokalizacji**

Techniczne kryteria do oceny lokalizacji podziemnego magazynowania energii cieplnej określają istniejące warunki związane z infrastrukturą, które pozwalają na oszacowanie skomplikowania wykonania i podłączenia nowej instalacji w wybranej lokalizacji. Do przykładowych kryteriów technicznych można zaliczyć:

- rozmiar dostępnego terenu (powierzchnia i kształt działki),
- warunki dojazdu odpowiednich maszyn i urządzeń na teren budowy magazynu (drogi dojazdowe),
- stan istniejącej infrastruktury podziemnej,
- oddziaływanie pomiędzy sąsiadującymi magazynami,
- możliwość zagospodarowania istniejących wyrobisk (w tym otworów wiertniczych), składowisk, hałd,
- możliwość zagospodarowania odpadów powstających w czasie budowy,
- możliwość podłączenia magazynu do istniejącej infrastruktury (np. sieci ciepłowniczej, instalacji fotowoltaicznej),
- bliskość infrastruktury wytwarzania ciepła (lub ciepła odpadowego, nadprodukcji ciepła),
- możliwość wykorzystania istniejącej infrastruktury na magazyn i/lub do przesyłu ciepła,
- odległość magazynu od źródła nadwyżki energii (lub określenie strat na przesyśle),
- odległość magazynu do odbiorcy/sieci,
- rozwiązania techniczne magazynu (geometria magazynu, położenie magazynu względem kierunku przepływu wód podziemnych),
- sprawność energetyczna i egzegetyczna magazynu,
- trwałość magazynu,
- funkcja magazynu: grzanie/chłodzenie, dobowy/sezonowy.

## 6.4. Ekonomiczne kryteria do oceny lokalizacji

Przeprowadzenie oceny ekonomicznej opłacalności musi odbyć się już na etapie planowania inwestycji w celu określenia poziomu kosztów oraz potencjalnych zysków. Przedstawione kryteria pozwalają na ocenę opłacalności inwestycji i poziomu ryzyka inwestycyjnego. Do przykładowych kryteriów ekonomicznych można zaliczyć:

- koszty pozyskania nieruchomości na magazyn,
- nakłady inwestycyjne w tym koszty inwestycji w zależności od projektowanych rozwiązań technicznych,
- czas zwrotu kosztów inwestycji,
- zapewnienie odbiorców na energię ciepłą z magazynu,
- zapotrzebowanie odbiorców na energię ciepłą z magazynu,
- możliwość rozbudowy magazynu,
- kondycja finansowa przedsiębiorstwa/inwestora,
- koszt energii (prognoza zmiany kosztu energii po zaimplementowaniu technologii magazynowania energii cieplnej),
- wskaźnik LCOH (długookresowy średni koszt wytworzenia energii w okresie całego czasu życia projektu inwestycyjnego, uwzględniający koszty inwestycyjne, operacyjne i oczekiwane rezultaty finansowe (moduł CAPEX, OPEX oraz DYSKONTO) (<https://www.gov.pl/attachment/a81cd2ea-0d8d-43fc-a984-7cbdf921e353>))
- dostępność do pomocy publicznej oraz innych form wsparcia finansowego (możliwość otrzymania dofinansowania, sfinansowania, pożyczki, kredytu).

## 6.5. Środowiskowe kryteria do oceny lokalizacji

Kryteria środowiskowe pozwalają na ocenę potencjalnego wpływu magazynu ciepła na lokalizację. Szczegółowa analiza pozwala na predykcję i zmniejszenie oddziaływania na otoczenie i środowisko, ochronę zasobów naturalnych oraz zmniejszenie szkodliwych emisji (Tabela 26).

**Tabela 26 Kryteria środowiskowe do oceny lokalizacji**

Środowiskowe kryteria do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji					
	małe/brak		średnie		duże	
Oddziaływanie na środowisko (wynikające z raportu oddziaływania na środowisko - jeśli wymagany, lub z innego dokumentu, analizy)	nie występują na terenie lokalizacji, ani w bezpośrednim sąsiedztwie		występują w bezpośrednim sąsiedztwie		występują na terenie lokalizacji	
Występowanie obszarów chronionych	mały		średni		duży	
Wpływ na krajobraz	Przydatne do budowy		Przydatne do budowy z ograniczeniami		Nieprzydatne do budowy	
Pokrycie i zagospodarowanie terenu wg klas CORINE ( <a href="https://clc.gios.gov.pl/index.php/oclc/legenda">https://clc.gios.gov.pl/index.php/oclc/legenda</a> )	BTES, EF(TG)	PTES/TTES	BTES, EF(TG)	PTES/TTES	BTES, EF(TG)	PTES/TTES
	zabudowa miejska, tereny przemysłowe, handlowe i komunikacyjne, kopalnie, wyrobiska i budowy (po zakończeniu eksploatacji)	kopalnie, wyrobiska i budowy (po zakończeniu eksploatacji)	miejskie tereny zielone i wypoczynkowe, tereny rolne, lasy i ekosystemy seminaturalne	zabudowa miejska luźna, tereny przemysłowe, handlowe i komunikacyjne, miejscowe tereny zielone i wypoczynkowe, tereny rolne, lasy i ekosystemy seminaturalne	obszary podmokłe, obszary wodne	zabudowa miejska zwarta, obszary podmokłe, obszary wodne

Środowiskowe kryteria do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji		
Redukcja emisji CO <sub>2</sub> i zanieczyszczeń	Znaczny wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do powietrza z innych źródeł wytwarzających energię elektryczną i ciepło	Średni wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do powietrza z innych źródeł wytwarzających energię elektryczną i ciepło	Niski wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do powietrza z innych źródeł wytwarzających energię elektryczną i ciepło
Rodzaj źródła nadwyżki energii przeznaczonej do magazynowania	odnawialne źródła energii	różne źródła energii	energia nieodnawialna

## 6.6. Społeczne kryteria do oceny lokalizacji

Przy ocenie potencjalnej lokalizacji magazynu ciepła należy rozpoznać nastawienie poszczególnych interesariuszy do planowanej inwestycji, oraz ocenić możliwy wpływ inwestycji na lokalną społeczność (Tabela 27).

**Tabela 27 Kryteria społeczne do oceny lokalizacji**

Społeczne kryteria do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji		
Akceptacja społeczna dla potencjalnej lokalizacji magazynu ciepła	jest akceptacja	wywołuje podział w lokalnej społeczności	nie ma akceptacji
Zainteresowanie technologiami magazynowania energii cieplnej w górotworze (przez interesariuszy, społeczność, inwestorów, okoliczne zakłady produkujące nadwyżki energii)	jest zainteresowanie	magazynowanie energii cieplnej nie było jeszcze rozważane	nie ma zainteresowania
Akceptacja właściciela terenu	jest akceptacja	-	brak akceptacji
Akceptacja gminy/miasta	jest akceptacja	-	brak akceptacji

## 6.7. Polityczne kryteria do oceny lokalizacji

Przy planowaniu instalacji magazynu ciepła należy uwzględnić polityki i strategie krajowe, kierunki rozwoju Unii Europejskiej, światowe wyzwania i problemy dotyczące globalnego ocieplenia klimatu i walki z jego skutkami, realizację celów zrównoważonego rozwoju, które mogą wpływać na wsparcie planowanej inwestycji, bądź identyfikować ograniczenia (Tabela 28).

**Tabela 28 Kryteria polityczne do oceny lokalizacji**

Polityczne kryteria do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji		
Możliwości powstania zagrożeń dla dostępu do źródeł energii, dróg transportowych, urządzeń przetwarzających energię oraz wynikających z konfliktów politycznych i działań wojennych	poza strefą nadgraniczną	na granicy strefy	w strefie nadgranicznej
Skala przedsięwzięcia	zintegrowane z siecią ciepłowniczą	budynki wielkopowierzchniowe, zastosowanie przemysłowe, infrastruktura transportowa	budynki wielomieszkaniowe, budynki jednorodzinne
Znaczenie w skali kraju	strategiczne	regionalne	lokalne

## 7. Charakterystyka geologicznych kryteriów do oceny lokalizacji podziemnych magazynów ciepła

Kryteria geologiczne odgrywają podstawową rolę przy wyborze lokalizacji podziemnych magazynów ciepła pracujących w trybie sezonowym, z tego względu zostały one szczegółowo opisane. Obejmują wiele aspektów, w tym m.in. właściwości termiczne gruntów i skał, jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego, właściwości fizyczno-mechaniczne podłoża, warunki wodne.

Analiza literatury umożliwiła przygotowanie zbioru kryteriów geologicznych do oceny lokalizacji podziemnych magazynów ciepła, które zaleca się wykorzystywać do oceny przydatności terenu do budowy magazynów.

Ocena kryterialna dotyczy danych zebranych na terenie wyznaczonym do analizy. W przypadku opracowania jest to bufor o promieniu 1000 metrów, wyznaczony od źródła nadwyżki energii elektrycznej bądź cieplnej. Kryteria można podzielić na dwie grupy:

- GRUPA I - stanowią kryteria służące ocenie ukształtowania terenu i procesów geologicznych zachodzących **na powierzchni lokalizacji**,
- GRUPA II - odnosi się do **syntetycznego profilu litologicznego** wyznaczonego dla danej lokalizacji (do wybranej głębokości, w zależności od technologii) i służy ocenie właściwości ośrodka gruntowo-skalnego pod kątem możliwości magazynowania energii cieplnej.

Stosowalność wybranych kryteriów podzielona jest również ze względu na rodzaj technologii (kryteria dotyczące magazynów otworowych takich jak BTES i EF(TG) oraz kryteria dotyczące magazynów zbiornikowych PTES i TTES).

Zaproponowano 15 kryteriów w podziale na dwie grupy:

- KRYTERIA GRUPY I:
  - spadki powierzchni terenu,
  - forma geomorfologiczna,
  - niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie,
  - dostępność złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła,
  - sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych,
- KRYTERIA GRUPY II:
  - jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego,
  - urabialność gruntów i skał,
  - zwiercalność gruntów i skał,
  - procentowy udział utworów o wysokim ryzyku przepływu wód podziemnych o dużej prędkości,
  - przewodność termiczna gruntów i skał,
  - objęściowa pojemność cieplna gruntów i skał,
  - przydatność gruntów i skał z wykopów do wbudowania w nasyp,
  - głębokość do pierwszego zwierciadła wód podziemnych,
  - przydatność podłoża pod względem fizyczno-mechanicznym na potrzeby budowy podziemnych magazynów ciepła.

Dodatkowo wyróżniono kryterium oceny wynikającej ze wszystkich wyżej wymienionych kryteriów:

- stopień rozpoznania terenu.

Opis kryteriów geologicznych jest uzupełniany charakterystyką innych kryteriów warunkujących wybór lokalizacji, które pomimo optymalnych cech lokalizacji przeznaczonej na magazyn mogą ją wykluczyć z dalszych działań inwestycyjnych (Rozdział 6).

**UWAGA:** Rozdział 7 przedstawia tylko te geologiczne kryteria, które można ocenić na podstawie materiałów archiwalnych. W przypadku dostępu do innych, szczegółowych danych, istnieje możliwość oceny dodatkowych kryteriów geologicznych, wpływających na możliwości lokalizowania podziemnych magazynów ciepła. Przykład tych kryteriów to:

- rzeczywista prędkość przepływu wód podziemnych – podstawą do jej wyznaczenia są informacje na temat: lokalnego spadku hydraulicznego w danej warstwie wodonośnej, przekrój hydrogeologiczny, terenowe pomiary prędkości przepływu wód oraz modelowania numeryczne oparte na lokalnych danych wsadowych. Należy pamiętać, że w przypadku występowania wielu warstw wodonośnych w profilu, spadki hydrauliczne w poszczególnych warstwach na ogół nie będą jednakowe, a co za tym idzie, różne będą rzeczywiste prędkości przepływu (Hauryłekiewicz, 2005),
- kierunek przepływu wód podziemnych,
- profil temperaturowy (wykonane w istniejącym otworze profilowanie temperaturowe) z uwzględnieniem gradientu geotermicznego (parametr ważny przy modelowaniu naturalnej regeneracji górotworu),
- średnia efektywna przewodność termiczna górotworu pomierzona w wykonanym otworowym wymienniku ciepła za pomocą Testu Reakcji Termicznej (TRT).

### 7.1. Spadki powierzchni terenu

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Spadki powierzchni terenu na obszarze planowanego magazynu ciepła.

**Opis kryterium lokalizacji:** Obszary o znacznych deniwelacjach lub spadkach powierzchni terenu mogą utrudniać lub uniemożliwiać posadowienie magazynów ciepła czy wykonanie instalacji. Prace ziemne na obszarze o dużych spadkach powierzchni terenu wiązą się z wyższymi kosztami prac przygotowawczych, wykonawczych i eksploatacyjnych.

Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła spadki powierzchni terenu przypisano do trzech klas spadków obliczanych stosunkiem przyprostokątnych. Wydzielono klasy o następujących zakresach spadków:

- Klasa 1: spadek duży: powyżej 12%,
- Klasa 2: spadek średni: od 5% do 12%,
- Klasa 3: spadek mały: od 0% do 5%.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, TTES/PTES i EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział klas spadków występujących na obszarze lokalizacji (Tabela 29). Ocena opiera się na udziale procentowym spadków powierzchni terenu klasy 3 w całkowitej powierzchni obszaru planowanej lokalizacji magazynu ciepła.

**Tabela 29 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium spadków powierzchni terenu**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji
	Klasa spadków 1 powyżej 12%, duży	Klasa spadków 2 od 5% do 12%, średni	Klasa spadków 3 od 0% do 5%, mały	
Procentowy udział klas spadków terenu występujących na obszarze lokalizacji	każdy możliwy udział procentowy			> 75 % korzystna
				50-75 % średnio korzystna
				< 50 % niekorzystna

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - o numeryczny model terenu (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z pomiarów teledetekcyjnych i fotogrametrycznych).

## 7.2. Forma geomorfologiczna

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Rodzaj formy geomorfologicznej występującej na obszarze planowanego magazynu ciepła.

**Opis kryterium lokalizacji:** Znajomość uwarunkowań geomorfologicznych pozwala na wstępne określenie rodzajów gruntów i skał w podłożu, stopnia zróżnicowana rzeźby terenu i możliwej zmienności warunków litologicznych oraz wodnych. Część form geomorfologicznych można zakwalifikować, jako sprzyjające magazynowaniu energii (formy wskazujące na górotwór o niskiej filtracji, o niskim przepływie wód podziemnych), natomiast pewne formy sugerują niekorzystne warunki dla sezonowego magazynu ciepła (formy wskazujące na górotwór z wysokim przepływem wód podziemnych).

Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła formy geomorfologiczne przypisano do trzech grup w zależności od rodzaju magazynu (Tabela 30, Tabela 31). Wydzielono następujące grupy geomorfologiczne:

- Grupa A – formy geomorfologiczne sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła;
- Grupa B – formy geomorfologiczne średnio sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła;
- Grupa C – formy geomorfologiczne mało sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła.

**Tabela 30 Podział i przydatność form geomorfologicznych do lokalizowania magazynów typu BTES i EF(TG)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji (rodzaj magazynu ciepła)	Forma geomorfologiczna	Grupa geomorfologiczna
Forma geomorfologiczna (BTES, EF(TG))	- wysoczyzna polodowcowa - formy pochodzenia jeziornego - suche doliny - równiny denudacyjne	Grupa geomorfologiczna A formy geomorfologiczne sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła
	- moreny czołowe - zagłębienia polodowcowe - równiny zastoiiskowe - pokrywy deluwalne - powierzchnie erozyjno-denudacyjne - niecki i doliny erozyjno-denudacyjne	Grupa geomorfologiczna B formy geomorfologiczne średnio sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła
	- tarasy i równiny wodnolodowcowe - ozy i formy szczelinowe - kemy - drumliny - rynny polodowcowe - ostańce - stoki denudacyjno-erozyjne - mierzeje i plaże - wydmy - równiny piasków przewianych - zagłębienia deflacyjne - pokrywy lessowe - równiny torfowe - tarasy zalewowe - równiny deltowe - tarasy nadzalewowe i równiny akumulacyjne - starorzecza - stożki napływowe - osuwiska - formy krasowe - niecki osiadań pogórnicych (zapadliska) - wyrobiska, hałdy, zwałowiska	Grupa geomorfologiczna C formy geomorfologiczne mało sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła

**Tabela 31 Podział i przydatność form geomorfologicznych do lokalizowania magazynów typu PTES i TTES**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji (rodzaj magazynu ciepła)	Forma geomorfologiczna	Grupa geomorfologiczna
Forma geomorfologiczna (PTES/TTES)	- wysoczyzna polodowcowa - formy pochodzenia jeziornego - suche doliny - moreny czołowe - zagłębienia polodowcowe - obszary zastoiskowe - pokrywy deluwialne - powierzchnie erozyjno-denudacyjne - równiny denudacyjne - wyrobiska	Grupa geomorfologiczna A formy geomorfologiczne sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła
	- niecki i doliny erozyjno-denudacyjne - tarasy i równiny wodnolodowcowe - ozy i formy szczelinowe - kemy - drumliny - rynny polodowcowe - hałdy, zwałowiska	Grupa geomorfologiczna B formy geomorfologiczne średnio sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła
	- ostańce - stoki denudacyjno-erozyjne - mierzeje i plaże - wydmy - równiny piasków przewianych - zagłębienia deflacyjne - pokrywy lessowe - równiny torfowe - równiny zalewowe - równiny deltowe - starorzecza - długie stoki - osuwiska - formy krasowe - niecki osiadań pogórnicych (zapadliska) - tarasy nadzalewowe i równiny akumulacyjne	Grupa geomorfologiczna C formy geomorfologiczne mało sprzyjające lokalizacji magazynu ciepła

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES, EF(TG)

**Ocena lokalizacji.** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział grup geomorfologicznych występujących na obszarze lokalizacji (Tabela 32). Ocena opiera się na udziale procentowym form geomorfologicznych grupy A w całkowitej powierzchni obszaru planowanej lokalizacji magazynu ciepła.

**Tabela 32 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium geomorfologicznego**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji
	Grupa geomorfologiczna C	Grupa geomorfologiczna B	Grupa geomorfologiczna A	
Forma geomorfologiczna – grupa geomorfologiczna				
Procentowy udział grup geomorfologicznych występujących na obszarze lokalizacji	każdy możliwy udział procentowy			> 75 % korzystna
				50-75 % średnio korzystna
				< 50 % niekorzystna

**Źródło danych do oceny lokalizacji:**

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - o Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - o Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - o Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);

- dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl/>);
- numeryczny model terenu (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z pomiarów teledetekcyjnych i fotogrametrycznych).

### 7.3. Niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Występowanie lub możliwość występowania niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich.

**Opis kryterium lokalizacji:** Niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie komplikują warunki lokalizacji i zwiększają ryzyko przy budowie, eksploatacji oraz likwidacji podziemnych magazynów ciepła. W ocenie lokalizacji zaleca się uwzględniać zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie podane w tabeli (Tabela 33).

**Tabela 33 Rodzaje niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich (Majer, Sokolowska, Majer (red.) i in. 2023, zmienione)**

Niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie	
Naturalne	Zjawiska i procesy pęcznienia i skurczu (ekspansywność)
	Zjawiska i procesy sufozji
	Zjawiska i procesy upłynniania
	Osiadanie zapadowe i rozmywanie
	Przebicie/wyparcie hydrauliczne
	Rozmakanie (uplastycznienie)
	Wysadzinowość
	Duża ściśliwość gruntów/skał
	Zjawiska i procesy erozji wglębnej i denudacji
	Zjawiska i procesy abrazji
	Zjawiska i procesy ablacji i soliflukcji
	Zjawiska i procesy krasowe
	Zjawiska i procesy wietrzenia
	Zjawiska i procesy dotyczące ruchów masowych ziemi
	Zjawiska i procesy tektoniczne
	Zjawiska i procesy sejsmiczne
	Występowanie gruntów organicznych
Zjawiska i procesy hydrologiczne (mokradała, obszary zagrożone podtopieniami, obszary, na których stwierdzono występowanie podtopień, obszary o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi raz na 500 lat (Q 0,2%)	
Zjawiska i procesy hydrogeologiczne (obszary występowania pierwszego poziomu wodonośnego o znacznie zróżnicowanych warunkach występowania i własnościach warstw wodonośnych, źródła, wysięki, obszar potencjalnego występowania wód zawieszonych, obszar potencjalnego występowania okresowych wód podziemnych, obszar w którym stwierdzono występowanie artezyjskiego zwierciadła wód podziemnych)	
Antropogeniczne	Tereny górnicze
	Obszary, na których stwierdzono szkody górnicze
	Niestabilne formy powstałe w wyniku szkód górniczych np. zapadliska
	Obszary płytkiej działalności górniczej
	Tereny historycznej działalności górniczej
	Indukowane wstrząsy sejsmiczne
	Zmiany stosunków wodnych (leje depresji, obniżenia terenu, podtopienia)
	Niewybuchy
	Występowanie gruntów antropogenicznych
	Składowiska odpadów
	Szkody i zanieczyszczenia środowiska

Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła konieczne jest przeanalizowanie, jaka jest możliwość wystąpienia na obszarze lokalizacji niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich. Przyjęto następujący podział:

- niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie lokalizacji nie występują na obszarze;
- niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie mogą potencjalnie wystąpić na obszarze lokalizacji;
- niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie występują na obszarze lokalizacji.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES, EF (TG).

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział obszaru, na którym nie występują niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie na obszarze lokalizacji (Tabela 34). Ocena opiera się na udziale procentowym terenu, na którym nie występują niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie w całkowitej powierzchni obszaru planowanej lokalizacji magazynu ciepła.

**Tabela 34 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium występowania lub możliwości wystąpienia niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji
	Występują	Mogą potencjalnie wystąpić	Nie występują	
Występowanie lub możliwość występowania niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich				
Procentowy udział niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich na obszarze lokalizacji	każdy możliwy udział procentowy		> 75 %	korzystna
			50-75 %	średnio korzystna
			< 50 %	niekorzystna

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:500 000 wraz z objaśnieniami ([https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas\\_y\\_gi/mapy](https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/mapy); <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Przeglądowa mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:300 000 ([https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas\\_y\\_gi/mapy](https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/mapy); <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 ([https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas\\_y\\_gi/mapy](https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/mapy); <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 ([https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas\\_y\\_gi/atlas\\_y](https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/atlas_y); <https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Centralna Baza Danych Geologicznych (CBDG) - uskoki (<https://baza.pgi.gov.pl/>);
  - Baza SOPO System Oslony Przeciwosuwiskowej (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geozagro%C5%BCenia>; <https://www.pgi.gov.pl/osuwiska.html>),
  - Rejestr terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi oraz terenów, na których występują te ruchy prowadzony przez Starostę (Dz.U. 2020 poz. 2270);
  - Zapadliska (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Zapadliska>; <https://www.pgi.gov.pl/zapadliska.html>);
  - Monitoring osiadań (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Deformacje-terenu>; <https://www.pgi.gov.pl/monitoring-osiadan.html>);

- Monitoring geodynamiczny (<https://www.pgi.gov.pl/mogepl-home/monitoring-geodynamiczny.html>);
  - Obszary zagrożone podtopieniami ([https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geozagro%C5%BCenia](https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geozagro%C5%BCenia;));
  - Monitoring Odkrywkowej Eksploatacji Kopalni MOEK (<https://geoportal.pgi.gov.pl/srodowiskowa/dzialalnosc/moek>; <https://www.pgi.gov.pl/geologia-samorzadowa/news-gs/12901-monitoring-odkrywkowej-eksploatacji-kopalin.html>);
  - System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych Polski MIDAS (<https://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/midas>);
  - Informatyczny System Osłony Kraju ISOK (<https://isok.gov.pl/index.html>);
  - Geoserwis GDOŚ (<https://geoserwis.gdos.gov.pl/mapy/?usedesktop=true>);
  - baza BDOT10k (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/baza-danych-objektow-topograficznych-bdot10k/>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
  - numeryczny model terenu (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych).

#### 7.4. Dostępność złóż kopalni

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Dostępność złóż kopalni, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła.

**Opis kryterium lokalizacji:** W przypadku magazynów zbiornikowych typu PTES/TTES, jeśli materiał uzyskany z wykopów nie może być wykorzystany do budowy magazynu, konieczne jest dostarczenie surowców ze złóż kopalni z innego miejsca. Im złożo kopaliny występuje bliżej potencjalnej lokalizacji podziemnego magazynu ciepła tym koszt budowy będzie niższy. Kryterium może być wykorzystane do przeprowadzenia analiz ekonomicznych, pod względem kosztów transportu surowców przydatnych do budowy magazynu.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: PTES, TTES

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący odległość złóż kopalni w kilometrach od potencjalnej lokalizacji podziemnego magazynu ciepła (Tabela 35).

**Tabela 35 Ocena lokalizacji na podstawie kryterium dostępność złóż kopalni, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Dostępność złóż kopalni, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła (miara: odległość złóż kopalni w kilometrach od potencjalnej lokalizacji)	0 - ≤ 20 km	korzystna
	> 20 - ≤ 60 km	średnio korzystna
	> 60 km	niekorzystna

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- dane literaturowe w szczególności Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych MIDAS;
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);

- wyniki badań laboratoryjnych.

## 7.5. Sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Sezonowe zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych

**Opis kryterium lokalizacji:** Głębokość występowania zwierciadła wód podziemnych podlega sezonowym wahaniom, które zależne są od czynników klimatycznych, budowy geologicznej i rzeźby terenu. Oceniając wpływ występowania wód podziemnych na planowaną instalację należy uwzględnić możliwe wahania zwierciadła – im są większe, tym więcej wariantów wahań zwierciadła wód podziemnych należy uwzględnić w ocenie lokalizacji magazynu ciepła. Amplituda wahań jest z reguły większa w skałach szczelinowych niż w utworach porowych (Chełmiński, 1991).

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES i EF(TG).

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się jakościowy wskaźnik opisujący sezonowe zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych (Tabela 36).

**Tabela 36 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium sezonowych zmian położenia zwierciadła wód podziemnych**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Sezonowe zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych (amplituda wahań w skali roku)	Niskie (<1 m)	korzystna
	Średnie (1-2 m)	średnio korzystna
	Wysokie (>2 m)	niekorzystna

### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - Baza danych Monitoring Wód Podziemnych (<https://www.pgi.gov.pl/psh/dane-hydrogeologiczne-psh/947-bazy-danych-hydrogeologiczne/8887-bazy-danych-monitoring-wod-podziemnych.html>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
  - numeryczny model terenu (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych).

## 7.6. Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznych profilach litologicznych.

**Opis kryterium lokalizacji:** Podłoże, gdzie planowana jest lokalizacja magazynu ciepła jest opisywane za pomocą syntetycznego profilu litologicznego, rozumianego jako graficzna prezentacja wzajemnego położenia zbliżonych litogenetycznie gruntów i skał oraz występowania wód podziemnych na obszarze danej lokalizacji (Morawski (red.) i in. 2018, zmienione). Im liczba

syntetycznych profili opisujących daną lokalizację jest większa, tym warunki geologiczne są bardziej zróżnicowane, a co za tym idzie konieczne jest wykonanie większej liczby badań, a obliczenia projektowe są bardziej skomplikowane. Istnieje większe ryzyko utrudnień podczas budowy i eksploatacji magazynu.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES, TTES i EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy wskaźnik opisujący liczbę syntetycznych profili litologicznych wyznaczonych na obszarze, gdzie planowana jest lokalizacja magazynu (Tabela 37).

**Tabela 37 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium jednorodności ośrodka gruntowo-skalnego**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego ujęta w liczbie syntetycznych profili litologicznych *	1 lub 2 profile opisują lokalizację	korzystna
	3 profile opisują lokalizację	średnio korzystna
	4 i więcej profili opisuje lokalizację	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 300 m p.p.t. (a w przypadku braku danych do 100 m p.p.t.) w przypadku BTES, 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG), 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8)		

### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
  - numeryczny model terenu (<https://www.geoportal.gov.pl/pl/dane/numeryczny-model-terenu-nmt/>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych).

## 7.7. Zwiercalność gruntów i skał

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Zwiercalność gruntów i skał.

**Opis kryterium lokalizacji:** W przypadku wierceń, nieciągłości i miejscowe zmiany właściwości górotworu związane ze zmianami litologicznymi w profilu powodują konieczność doboru odpowiednich narzędzi wiertniczych oraz ich zmiany podczas wiercenia, co generuje większe koszty oraz wydłuża czas robót. Przy magazynach otworowych ocenę można przeprowadzić określając zwiercalność gruntów i skał. Wydzielono następujące grupy zwiercalności gruntów i skał<sup>2</sup>:

<sup>2</sup> Wartości Rc podano według zaleceń dr hab. inż. Tomasza Śliwy (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Wiertnictwa i Geoinżynierii)

- Grunty –  $c_u < 300$  kPa ( $R_c < 0,6$  MPa),<sup>3</sup>
- Formacje bardzo miękkie – skały bardzo miękkie, nieuwarstwione i słabo zwięzłe, o wysokiej zwiercalności (iłowupki, ily, słabo zwięzłe łupki i piaskowce, wapienie margliste, sole, gipsy, węgle, ziemiste rudy żelaza),  $0,6$  MPa  $< R_c < 70$  MPa,
- Formacje miękkie – skały miękkie (skonsolidowane piaskowce, tufy, łupki, wapienie, marmury, średniej twardości łupki),  $70$  MPa  $< R_c < 180$  MPa,
- Formacje średnie – twarde i średnio ścierające skały, (piaskowce z żyłami kwarcu, twarde wapienie, rogowce, zlepieńce o spoiwie żelazistym bądź krzemionkowym, dolomity krystaliczne, rudy hematytowe, syderyty, limonity, twarde łupki),  $180$  MPa  $< R_c < 300$  MPa,
- Formacje twarde – twarde, ścierające skały, (piaskowce o spoiwie kwarcytowym, twarde piaskowce z wkładkami rogowca, twarde łupki kwarcytowe, skały magmowe i metamorficzne),  $R_c > 300$  MPa.

Im większa liczba zmian w profilu pionowym pomiędzy grupami zwiercalności, tym bardziej skomplikowany i czasochłonny proces wiercenia.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła typu BTES, EF(TG) wykorzystuje się jakościowy wskaźnik opisujący liczbę zmian litologicznych pomiędzy grupami zwiercalności w syntetycznym profilu litologicznym (Tabela 38).

**Tabela 38 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium zwiercalności gruntów i skał dla BTES, EF(TG)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Zwiercalność gruntów i skał (BTES, EF(TG)) - liczba zmian formacji w syntetycznym profilu litologicznym pomiędzy grupami zwiercalności*	Brak zmian	korzystna
	1 -2 zmiany	średnio korzystna
	3 i więcej zmian	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 300 m p.p.t. (a w przypadku braku danych do 100 m p.p.t.) w przypadku BTES, 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG) lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8).		

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - o dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - o Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - o Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - o Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - o Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - o dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);
  - o wyniki prac i badań laboratoryjnych.

<sup>3</sup> Według PN-EN ISO 14688-1:2018-05

## 7.8. Urabialność gruntów i skał

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Urabialność gruntów i skał.

**Opis kryterium lokalizacji:** W przypadku wykonywania zbiornikowych magazynów ciepła istotna jest urabialność gruntów i skał wydobywanych z wykopu. Im skały/grunty są trudniej urabialne tym konieczne jest wykorzystanie metod bardziej kosztownych, czasochłonnych i energochłonnych. Urabialność gruntów i skał ocenia się zgodnie z normą *PN-B-06050:1999 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne*. Zgodnie z normą grunty i skały zostały podzielone na siedem kategorii w zależności od specyfiki i stopnia trudności urabiania:

- Kategoria 1: Gleba. Wierzchnia warstwa gruntu zawierająca oprócz materiałów nieorganicznych: żwiru, piasku, pyłu, łu, również części organiczne: próchnicę (humus) oraz organizmy żywe.
- Kategoria 2: Grunty płynne. Grunty w stanie płynnym, trudno oddające wodę.
- Kategoria 3: Grunty łatwo urabialne: a) grunty niespoiste i mało spoiste: grunty frakcji żwirowej lub piaskowej oraz ich mieszaniny, z domieszką do 15 % cząstek frakcji pyłowej i iłowej, zawierające mniej niż 30 % kamieni i głazów o objętości do 0,01 m<sup>3</sup> (co odpowiada kuli o średnicy ≈ 0,30 m), b) grunty organiczne o małej zawartości wody, dobrze rozłożone, słabo skonsolidowane.
- Kategoria 4: Grunty średnio urabialne: a) mieszaniny frakcji żwirowej, piaskowej, pyłowej i iłowej, zawierające więcej niż 15 % cząstek frakcji pyłowej i iłowej, b) grunty spoiste o wskaźniku plastyczności  $I_p \leq 15$  %, w stanie od plastycznego do półzwarłego, zawierające nie więcej niż 30 % kamieni i głazów o objętości do 0,01 m<sup>3</sup>, c) grunty organiczne skonsolidowane ze szczątkami drzew.
- Kategoria 5: Grunty trudno urabialne: a) grunty jak w kategorii 3 i 4, lecz zawierające więcej niż 30 % kamieni i głazów o objętości do 0,01 m<sup>3</sup>, b) grunty niespoiste i spoiste zawierające mniej niż 30% głazów o objętości od 0,01 m<sup>3</sup> do 0,1 m<sup>3</sup> (objętość 0,1 m<sup>3</sup> odpowiada kuli o średnicy ≈ 0,60 m), c) grunty bardzo spoiste ( $W_L \geq 70$  %), w stanie od plastycznego do półzwarłego ( $0,50 \geq I_L \geq 0$ ).
- Kategoria 6: Skały łatwo urabialne i porównywalne rodzaje gruntu: a) skały mające wewnętrzną cementację ziaren, lecz mocno spękane, łamliwe, kruche, łupkowate, miękkie lub zwietrzałe, b) porównywalne grunty zwięzłe lub zestalone (np. przez wyschnięcie, zamrożenie, związanie chemiczne), spoiste lub niespoiste, c) grunty niespoiste i spoiste zawierające więcej niż 30 % głazów o objętości od 0,01 m<sup>3</sup> do 0,1 m<sup>3</sup>.
- Kategoria 7: Skały trudno urabialne: a) skały mające wewnętrzną cementację ziaren i dużą wytrzymałość strukturalną, lecz spękane lub zwietrzałe, b) zwięzłe, nie zwietrzałe łupki ilaste, warstwy zlepieńców, hutnicze hałdy żużlowe itp. c) głazy o objętości powyżej 0,1 m<sup>3</sup>.

Na potrzeby oceny lokalizacji zbiornikowych magazynów ciepła kategorie urabialności przypisano do trzech grup urabialności z uwagi na rodzaj stosowanych technik urabiania. Wydzielono następujące grupy urabialności gruntów i skał:

- Grupa A – grunty łatwo urabialne: Kategoria 1, Kategoria 2, Kategoria 3,
- Grupa B – grunty średnio i trudno urabialne: Kategoria 4, Kategoria 5,
- Grupa C – skały łatwo i trudno urabialne: Kategoria 6, Kategoria 7.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: PTES/TTES

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła typu PTES/TTES wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział grup urabialności w syntetycznym profilu litologicznym (Tabela 39). Ocena opiera się na udziale procentowym gruntów grupy A.

**Tabela 39 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium urabialność gruntów i skał dla PTES/TTES**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji	
Urabialność gruntów i skał (PTES/TTES) – grupa urabialności	Grupa urabialności C	Grupa urabialności B	Grupa urabialności A		
Procentowy udział grup urabialności w syntetycznym profilu litologicznym	każdy możliwy udział procentowy			> 75 %	korzystna
				50-75 %	średnio korzystna
				< 50 %	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 9).					

### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);
  - wyniki prac i badań laboratoryjnych.

## 7.9. Procentowy udział utworów o wysokim ryzyku przepływu wód podziemnych o dużej prędkości

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Procentowy udział utworów o istniejącym ryzyku wysokiego przepływu wód podziemnych w syntetycznym profilu litologicznym do projektowanej głębokości magazynu.

**Opis kryterium lokalizacji:** Wysoka prędkość przepływu wód podziemnych może wpływać na migrację akumulowanej energii termicznej poza obszar magazynowania. Prawidłowe określenie rzeczywistej prędkości ruchu wody podziemnej dla różnych poziomów wodonośnych stwarza duże trudności i wymaga pomiarów terenowych jak i wykorzystania metod statystycznych oraz modelowania. We wstępnej ocenie kryterialnej lokalizacji należy wykorzystać parametry wskazujące na ryzyko występowania wysokich prędkości przepływu wód podziemnych.

Współczynnik filtracji **k** jest miarą wodoprzepuszczalności ośrodka gruntowo-skalnego (Pisarczyk, 2001). Zależy on w dużej mierze od uziarnienia, struktury oraz porowatości efektywnej lub szczelinowatości otwartej. Wysoka wartość współczynnika filtracji w górotworze, w którym znajduje się instalacja magazynująca energię cieplną, wiąże się z możliwością występowania dużej prędkości

przepływu wód podziemnych. Wraz ze współczynnikiem filtracji, istotny w wyznaczeniu prędkości przepływu wód podziemnych jest także spadek (gradient) hydrauliczny. Im spadek jest wyższy, tym prędkość przepływu rośnie.

Jeżeli udział gruntów i skał w syntetycznym profilu litologicznym o współczynniku filtracji poniżej  $10^{-6}$  m/s (Tabela 40) jest większy, to mniejsze jest ryzyko migracji zmagazynowanego ciepła w ośrodku gruntowo-skalnym związane z przepływem wód podziemnych. Niski współczynnik filtracji redukuje również ryzyko cyrkulacji konwekcyjnej w warstwie wodonośnej, która mogłaby prowadzić do ucieczki magazynowanej energii cieplnej.

**UWAGA:** Powyższa ocena kryterialna może być stosowana jako bardzo wstępne określenie możliwych warunków hydrogeologicznych lokalizacji, w przypadku braku dokładniejszych danych. Do wyznaczenia wartości prędkości przepływu konieczne są bezpośrednie pomiary terenowe, laboratoryjne, bądź obliczeniowe uwzględniające takie czynniki jak np. lokalny spadek hydrauliczny.

Przy bardzo niskim lokalnym spadku hydraulicznym, nawet w wysoce przepuszczalnym gruncie i/lub skale nie wystąpi migracja ciepła na drodze adwekcji.

**Tabela 40 Klasyfikacja gruntów i skał według właściwości filtracyjnych oraz ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych**

Termin opisujący grunty i skały pod względem przepuszczalności*	Rodzaj gruntu/ skały*	Klasy współczynnika filtracji $k$ [m/s]*	Strefa saturacji	Strefa aeracji**
Praktycznie nieprzepuszczalne	Iły, iłolupki, zwarte gliny ilaste, margle ilaste, skały masywne niespękane	$k < 10^{-8}$ m/s	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych
Półprzepuszczalny	Gliny, namuły, mułowce, iły piaszczyste	$10^{-8} \leq k \leq 10^{-6}$ m/s	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych
Słabo przepuszczalny	Piaski pylaste, gliniaste, mułki, piaskowce, skały masywne z rzadką siecią drobnych spękań	$10^{-6} \leq k < 10^{-5}$ m/s	Niskie ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych
Średnio przepuszczalny	Piaski drobnoziarniste, równomiernie uziarnione, less	$10^{-5} \leq k < 10^{-4}$ m/s	Występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych
Dobrze przepuszczalny	Piaski gruboziarniste, nieco ilaste, piaski różnoziarniste, piaski średnioziarniste, krucho, słabo spojone gruboziarniste piaskowce, skały masywne z gęstą siecią szczelin	$10^{-4} \leq k < 10^{-3}$ m/s	Występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych
Bardzo dobrze przepuszczalny	Rumosze, żwiry, żwiry piaszczyste, gruboziarniste i równoziarniste piaski, skały masywne z bardzo gęstą siecią drobnych szczelin	$k > 10^{-3}$ m/s	Występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	Nie ma ryzyka wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych

\* - Pazdro, 1983  
 \*\* - strefa aeracji, przy okresowym dopływie wód infiltracyjnych, zwłaszcza w przypadku wysokiego współczynnika filtracji, może stanowić strefę czasowej utraty ciepła na skutek przepływu wód podziemnych i związanego z nim transportu masy i energii. Z uwagi, że przepływ ten ma zazwyczaj charakter krótkotrwały, ryzyko zwiększonej prędkości przepływu wód podziemnych w strefie aeracji jest nieistotne w kontekście długoterminowego magazynowania ciepła.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES i EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych, bądź jest ono niskie, w syntetycznym profilu litologicznym określony do projektowanej głębokości magazynu (Tabela 41).

**Tabela 41 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium procentowego udziału utworów, w których nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Procentowy udział utworów, w których nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych, bądź jest ono niskie, w syntetycznym profilu litologicznym do projektowanej głębokości magazynu*	>75 %	korzystna
	75-50 %	średnio korzystna
	<50 %	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 300 m p.p.t. (a w przypadku braku danych do 100 m p.p.t.) w przypadku BTES, 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG), 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8)		

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);
  - wyniki badań laboratoryjnych.

### 7.10. Przewodność termiczna gruntów i skał

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Średnia ważona przewodność termiczna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego.

**Opis kryterium lokalizacji:** Wartość przewodności termicznej utworów, w których znajduje się magazyn ciepła typu BTES i EF(TG), musi być na tyle wysoka, aby zapewnić dobry kontakt termiczny z wymiennikiem ciepła i umożliwić ładowanie magazynu. Jednocześnie zbyt wysoka wartość przewodności cieplnej górotworu może prowadzić do migracji ciepła poza planowany obszar magazynowania i skutkować jego mniejszą wydajnością. W przypadku magazynów zbiornikowych typu PTES i TTES im niższa przewodność termiczna górotworu, tym niższe straty ciepła magazynowanego w zbiorniku do otaczającego gruntu.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES, EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący przewodność termiczną ośrodka gruntowo-skalnego wynikającą z syntetycznego profilu litologicznego (Tabela 42, Tabela 43).

**Tabela 42 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium przewodność termiczna ośrodka gruntowo-skalnego dla magazynów bezzbiornikowych typu BTES i EF (TG)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji**	Ocena lokalizacji
Średnia ważona przewodność termiczna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego wyrażona w $W/(m \cdot K)^*$	1,5-2,5	korzystna
	1,0-1,5 lub 2,5-3,0	średnio korzystna
	<1,0 lub >3,0	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 300 m p.p.t. (a w przypadku braku danych do 100 m p.p.t.) w przypadku BTES, 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG) lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8).		
** wartości ustalono ekspercko na podstawie doświadczenia oraz danych z literatury		

**Tabela 43 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium przewodność termiczna ośrodka gruntowo-skalnego dla magazynów zbiornikowych typu PTES/TTES**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji**	Ocena lokalizacji
Średnia ważona przewodność termiczna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego wyrażona w $W/(m \cdot K)^*$	<1,3	korzystna
	1,3-1,8	średnio korzystna
	>1,8	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8).		
** wartości ustalono ekspercko na podstawie doświadczenia oraz danych z literatury		

### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - Mapa potencjału geotermii niskotemperaturowej (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Geotermia>);
- wyniki prac i badań terenowych;
- wyniki badań laboratoryjnych.

## 7.11. Objętościowa pojemność cieplna gruntów i skał

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Średnia ważona objętościowa pojemność cieplna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego.

**Opis kryterium lokalizacji:** Pojemność cieplna ośrodka gruntowo-skalnego jest jednym z najważniejszych parametrów opisujących przydatność wybranej lokalizacji do podziemnego magazynowania energii cieplnej w systemach typu BTES i EF(TG), gdzie medium akumulującym jest bezpośrednio górotwór. Im wyższa wartość pojemności cieplnej utworów, tym większa możliwa do zmagazynowania ilość energii (gęstość energii).

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, EF (TG).

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący średnią ważoną pojemność cieplną ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym (Tabela 44, Tabela 45).

**Tabela 44 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium średniej ważonej objętościowej pojemności cieplnej ośrodka gruntowo-skalnego BTES i EF (TG)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji**	Ocena lokalizacji
Średnia ważona pojemność cieplna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego wyrażona w $MJ/(m^3 \cdot K)$	>2,3	korzystna
	2,0-2,3	średnio korzystna
	<2,0	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 300 m p.p.t. (a w przypadku braku danych do 100 m p.p.t.) w przypadku BTES, 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG) lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8).		
** wartości ustalono ekspercko na podstawie doświadczenia oraz danych z literatury		

**Tabela 45 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium średniej ważonej objętościowej pojemności cieplnej ośrodka gruntowo-skalnego PTES, TTES**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji**	Ocena lokalizacji
Średnia ważona pojemność cieplna ośrodka gruntowo-skalnego wynikająca z syntetycznego profilu litologicznego wyrażona w MJ/(m <sup>3</sup> *K)	>2,0	korzystna
	1,8-2,0	średnio korzystna
	<1,8	niekorzystna
* Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego w syntetycznym profilu litologicznym należy wstępnie ocenić do głębokości 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES lub do głębokości optymalnej (patrz rozdział 8).		
** wartości ustalono ekspercko na podstawie doświadczenia oraz danych z literatury		

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- wyniki prac i badań terenowych;
- wyniki badań laboratoryjnych.

### 7.12. Przydatność podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Przydatność podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła.

**Opis kryterium lokalizacji:** Występowanie gruntów i skał o niskiej nośności i wytrzymałości oraz wysokiej odkształcalności w podłożu podziemnych magazynów ciepła wiąże się, w zależności od rodzaju magazynu, z trudnościami podczas wykonywania robót budowlanych, a także z ryzykiem uszkodzenia, co w konsekwencji może doprowadzić do awarii lub katastrofy. Przydatność podłoża na potrzeby budownictwa wpływa na warunki wykonania i eksploatacji magazynu oraz na sposób posadowienia magazynu, geometrię zbiornika, czy wymiary konstrukcji termoaktywnej.

Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła podłoże przypisano do trzech grup przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła (Tabela 46). Wydzielono następujące grupy przydatności podłoża:

- Grupa A – podłoże przydatne bez ograniczeń,
- Grupa B – podłoże przydatne po zastosowaniu prac i robót wzmacniających/polepszających,
- Grupa C – podłoże przydatne po analizie zachowania się podłoża oraz po zastosowaniu prac i robót polepszających.

**Tabela 46 Grupy przydatności podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła (Majer, Sokolowska (red.) i in. 2021)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Rodzaj podłoża	Przydatność podłoża
Przydatność podłoża na potrzeby budowy podziemnych magazynów ciepła	grunty gruboziarniste w stanie średnio zagęszczonym, zagęszczonym i bardzo zagęszczonym, grunty drobnoziarniste w stanie twardoplastycznym, półzwałtymi i zwartym, skały niespękane, skały średnio mocne, mocne, bardzo mocne i ekstremalnie mocne	Grupa przydatności podłoża A Podłoże przydatne bez ograniczeń
	grunty gruboziarniste w stanie luźnym, grunty drobnoziarniste w stanie plastycznym, skały spękane, skały słabe i umiarkowanie słabe	Grupa przydatności podłoża B Podłoże przydatne po zastosowaniu prac i robót polepszających
	grunty problematyczne (antropogeniczne, zanieczyszczone, zdegradowane, zdewastowane, wysadzinowe, organiczne, zwietrzelinowe, ekspansywne, zapadowe, tiksotropowe i inne podatne na deformacje filtracyjne), grunty gruboziarniste w stanie bardzo luźnym, grunty drobnoziarniste w stanie miękkoplastycznym, skały ekstremalnie i bardzo słabe	Grupa przydatności podłoża C Podłoże przydatne po analizie zachowania się podłoża oraz po zastosowaniu prac i robót polepszających

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: PTES i TTES

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział grup przydatności podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła w syntetycznym profilu litologicznym (Tabela 47). Ocena opiera się na udziale procentowym grupy A.

**Tabela 47 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium przydatności podłoża do posadowienia magazynu zbiornikowego**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji
	Grupa przydatności podłoża C	Grupa przydatności podłoża B	Grupa przydatności podłoża A	
Przydatność podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła do posadowienia magazynu zbiornikowego – grupa przydatności podłoża				
Procentowy udział grup przydatności podłoża w syntetycznym profilu litologicznym	każdy możliwy udział procentowy		> 75 %	korzystna
			50-75 %	średnio korzystna
			< 50 %	niekorzystna

#### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
  - dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);
- wyniki badań laboratoryjnych.

### 7.13. Przydatność gruntów i skał z wykopów do wbudowania w nasyp

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp.

**Opis kryterium lokalizacji:** W przypadku magazynów zbiornikowych typu PTES wykonuje się wykop, a z uzyskanego urobku buduje się nasypy, dzięki którym zwiększa się głębokość zbiornika. Analiza gruntów/skał pozyskanych z wykopu jest kluczowa w celu zapewnienia stateczności skarp nasypów, na które oddziaływać będą również obciążenia od wypełnionego wodą (bądź wodą ze żwirem) magazynu. Wbudowany w nasyp grunt/skała powinien również pełnić funkcję izolacji termicznej. Na podstawie tego kryterium można ocenić materiał pod kątem możliwości wykonania zbiornika.

Na potrzeby oceny lokalizacji magazynów ciepła grunty i skały występujące na obszarze lokalizacji magazynu przypisano do trzech grup przydatności gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp (Tabela 48):

- Grupa A – grunty/skały, które mogą być stosowane bez ograniczeń,

- Grupa B – grunty/skały, które mogą być stosowane w pewnych warunkach (np. po przesuszeniu, w niskich nasypach, zabezpieczone warstwą lepszych gruntów lub układane naprzemiennie z innymi gruntami),
- Grupa C – grunty/skały, które mogą być stosowane po uprzedniej analizie zachowania się nasypów podczas eksploatacji lub po specjalnych zabiegach uzdatniających.

**Tabela 48 Grupy przydatności gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp (Majer, Sokolowska (red.) i in. 2021)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Rodzaj gruntów/skał	Przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp
Przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp	grunty sypkie, grunty dobrze uziarnione ( $Cu \geq 6$ ) zawierające mniej niż 5% cząstek drobnych, skały o średniej twardości, skały twarde	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp A Grunty/skały, które mogą być stosowane bez ograniczeń
	grunty spoište o niskiej plastyczności, grunty spoište niewysadzinowe, grunty zawierające ponad 40% cząstek drobnych, grunty zawierające 15 do 40% cząstek drobnych, grunty zawierające od 5 do 15% cząstek drobnych z wyjątkiem gruntów zapadowych, grunty o jednorodnym uziarnieniu ( $Cu < 6$ ) zawierające mniej niż 5% cząstek drobnych z wyjątkiem gruntów zapadowych, skały bardzo podatne na wietrzenie (np. kreda, margiel, zwietrzały iłołupek), skały umiarkowanie podatne na wietrzenie (np. mało rozdrobniona kreda, niezwiertzały iłołupek), skały miękkie	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp B Grunty/skały, które mogą być stosowane w pewnych warunkach (np. po przesuszeniu, w niskich nasypach, zabezpieczone warstwą lepszych gruntów lub układane na przemiennie z innymi gruntami)
	grunty spoište wysadzinowe, grunty antropogeniczne, grunty organiczne, grunty tiksotropowe, grunty zawierające materiały rozpuszczalne (np. sól kamienna, gips), grunty zanieczyszczone (np. odpady przemysłowe), materiały wymieszane z organicznymi, grunty plastyczne zawierające ponad 15% cząstek drobnych, grunty zapadowe lub pęczniące	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp C Grunty/skały, które mogą być stosowane po uprzedniej analizie zachowania się nasypów w eksploatacji lub po specjalnych zabiegach uzdatniających

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: PTES, TTES

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się ilościowy parametr opisujący procentowy udział grup przydatności podłoża do posadowienia magazynu zbiornikowego w syntetycznym profilu litologicznym (Tabela 49). Ocena opiera się na udziale procentowym gruntów i skał grupy A.

**Tabela 49 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium przydatności gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji			Ocena lokalizacji
	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp C	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp B	Grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp A	
Przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp – grupa przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp				
Procentowy udział grup przydatności gruntów/skał do wbudowania w nasyp w syntetycznym profilu litologicznym	każdy możliwy udział procentowy		> 75 %	korzystna
			50-75 %	średnio korzystna
			< 50 %	niekorzystna

**Źródło danych do oceny lokalizacji:**

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);

- Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
- Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
- Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
- Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
- dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych);
- wyniki badań laboratoryjnych.

## 7.14. Głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych.

**Opis kryterium lokalizacji:** Obecność wód podziemnych komplikuje możliwości wykonania wykopów i prac ziemnych podczas budowy. Przy płytko występującym poziomie wód podziemnych (zwłaszcza powyżej poziomu posadowienia magazynu) może wystąpić konieczność wykonania dodatkowej izolacji, bądź wykonania dodatkowych systemów odwadniających.

Na potrzeby oceny, poziom posadowienia magazynu zbiornikowego ustalony jest na 10 m p.p.t.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: PTES/TTES

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się jakościowy wskaźnik głębokości do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych (Tabela 50).

**Tabela 50 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium głębokości do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych względem magazynu (PTES i TTES)**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych	Poniżej poziomu posadowienia magazynu	korzystna
	W poziomie posadowienia magazynu	średnio korzystna
	Powyżej poziomu posadowienia magazynu	niekorzystna

### Źródło danych do oceny lokalizacji:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach;
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie;
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych:
  - dane otworowe z zasobów bazy CBDG, CBDH, BDGI, punkty dokumentacyjne SMGP (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Otwory-i-punkty-badawcze>);
  - Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Mapy-geologiczne>);
  - Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Wody-podziemne>);
  - Mapa geologiczno-inżynierska w skali 1:50 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);

- Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 (<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Budownictwo>);
- dane otwarte z portalu dane.gov.pl (<https://dane.gov.pl/pl>);
- wyniki prac i badań terenowych (dane z otworów wiertniczych).

## 7.15. Stopień rozpoznania terenu

**Nazwa kryterium lokalizacji:** Stopień rozpoznania terenu pod lokalizację magazynu ciepła

**Opis kryterium lokalizacji:** Stopień rozpoznania terenu jest wskaźnikiem wykorzystywanym do zwaloryzowania oceny wynikającej ze wszystkich wyżej wymienionych kryteriów. Informacja geologiczna może pochodzić z danych archiwalnych, z badań terenowych i/lub z badań laboratoryjnych.

**Zakres stosowania:** Kryterium stosuje się do oceny magazynów: BTES, PTES/TTES, EF(TG)

**Ocena lokalizacji:** Do oceny lokalizacji magazynu ciepła wykorzystuje się jakościowy wskaźnik opisujący stopień rozpoznania terenu pod lokalizację magazynu ciepła (Tabela 51).

**Tabela 51 Ocena lokalizacji magazynu ciepła na podstawie kryterium stopnia rozpoznania terenu**

Nazwa kryterium do oceny lokalizacji	Miara kryterium do oceny lokalizacji	Ocena lokalizacji
Stopień rozpoznania terenu pod lokalizację magazynu ciepła	Dane archiwalne, wykonane badania podstawowe i szczegółowe	korzystna
	Dane archiwalne, wykonane badania podstawowe	średnio korzystna
	Dane archiwalne	niekorzystna

**Źródło danych do oceny lokalizacji:**

- rodzaj danych wykorzystanych do oceny kryteriów do oceny lokalizacji.

## 8. Metodyka oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła

Metodyka oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła jest procesem analitycznym, prowadzonym w kilku etapach, który uwzględnia wiele kryteriów (patrz rozdział 6 i 7) w celu wyboru optymalnego miejsca dla nowej inwestycji OZE. Metodyka pozwala na kompleksową ocenę lokalizacji podziemnego magazynu ciepła, minimalizując ryzyko i maksymalizując korzyści techniczne, ekonomiczne oraz środowiskowe.

Celem zaproponowanej metodyki jest zapewnienie, że wybrana lokalizacja będzie efektywnie usytuowana pod względem uwarunkowań geologicznych, dlatego obejmuje ocenę przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła tylko w zakresie kryteriów geologicznych (patrz rozdział 7).

Metodyka może być implementowana na potrzeby kompleksowych ocen przydatności lokalizacji do budowy magazynów ciepła, uwzględniających poza geologiczne kryteria do oceny lokalizacji (patrz rozdział 6). Kompleksowe oceny są opracowywane na różne potrzeby np. na potrzeby mapowania zasobów i potencjału odnawialnych źródeł energii w kraju, zgodnie z wymogami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniającej dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych oraz uchylającej dyrektywę Rady (UE) 2015/652 (tzw.

Dyrektywa RED III), a także Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. (aktualizacja KPEiK z 2019 r.).

Do kluczowych etapów procesu oceny przydatności i wyboru lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła należą (Rysunek 87):

- Przegląd lokalizacji (ang. site screening) – Etap I,
- Wybór lokalizacji (ang. site selection) – Etap II,
- Wstępna charakterystyka lokalizacji (ang. preliminary site characterisation) – Etap III,
- Szczegółowa charakterystyka lokalizacji (ang. detailed site characterisation) – Etap IV.



Rysunek 87 Etapy oceny lokalizacji w powiązaniu z ogólnym zakresem badań lokalizacyjnych

**Etap I - Przegląd lokalizacji** opiera się przede wszystkim na analizie ogólnodostępnych danych. W efekcie prac zostają wskazane lokalizacje obiektów z nadwyżką energii cieplnej (ewentualnie elektrycznej), czyli **potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów ciepła**.

**Etap II - Wybór lokalizacji** obejmuje analizę ogólnodostępnych danych w tym danych geologicznych oraz selekcję lokalizacji obiektów z nadwyżką energii cieplnej wskazanych na etapie Przeglądu lokalizacji z uwagi na różne czynniki np. dostępność danych. W efekcie prac zostają wybrane obiekty z nadwyżką energii cieplnej wyznaczone do oceny przydatności do budowy podziemnych magazynów energii, czyli **wybrane potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów ciepła**.

**Etap III – Wstępna charakterystyka lokalizacji** polega na opisie wszystkich wybranych potencjalnych lokalizacji magazynów ciepła w oparciu o dostępne dane, wyniki wizji terenowej, ewentualnie wstępnych badań lokalizacyjnych, a następnie przeprowadzeniu oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła. W efekcie zostaje sporządzony ranking potencjalnych lokalizacji podziemnych magazynów ciepła. Na podstawie wyników wykonanych prac, przeprowadzonej oceny przydatności oraz sporządzonego rankingu lokalizacji można podjąć decyzję o kontynuacji prac nad lokalizacją w tym prac projektowych i budowlanych.

**Etap IV – Szczegółowa charakterystyka lokalizacji** polega na przeprowadzeniu szczegółowych analiz i wykonaniu wstępnych (Etap IVa) i/lub szczegółowych (Etap IVb) badań lokalizacyjnych (terenowych i laboratoryjnych). Prace są realizowane w miejscu wybranej lokalizacji podziemnego magazynu ciepła w celu m.in. ustalenia technologii magazynowania energii cieplnej, opracowania

projektu budowlanego. Badania lokalizacyjne (terenowe i laboratoryjne) wykonuje się zazwyczaj w dwóch etapach z uwagi na brak wystarczających danych archiwalnych do odpowiedniego zaprojektowania badań na potrzeby prac projektowych.

Na każdym etapie oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła mogą być wykonywane badania lokalizacyjne (ang. site investigation), które obejmują (Rysunek 87):

- zebranie i przegląd danych archiwalnych (ang. desk study),
- wizję terenową (ang. Site inspection),
- badania wstępne (ang. Preliminary Site Investigation)),
- badania szczegółowe (ang. Detailed Site Investigation).

Wyniki wszystkich badań lokalizacyjnych gromadzi się w bazie danych oraz archiwizuje. Proces gromadzenia danych i wyników badań lokalizacyjnych obejmuje:

- zbieranie i przegląd danych archiwalnych,
- projektowanie badań lokalizacyjnych,
- wykonywanie badań lokalizacyjnych,
- przetwarzanie, interpretowanie, modelowanie wyników badań lokalizacyjnych,
- analizę i ocenę wyników badań lokalizacyjnych,
- przedstawianie wyników badań lokalizacyjnych w odpowiedniej formie.

Schemat gromadzenia danych i wyników badań lokalizacyjnych (dokumentowania) przedstawia rysunek (Rysunek 88).



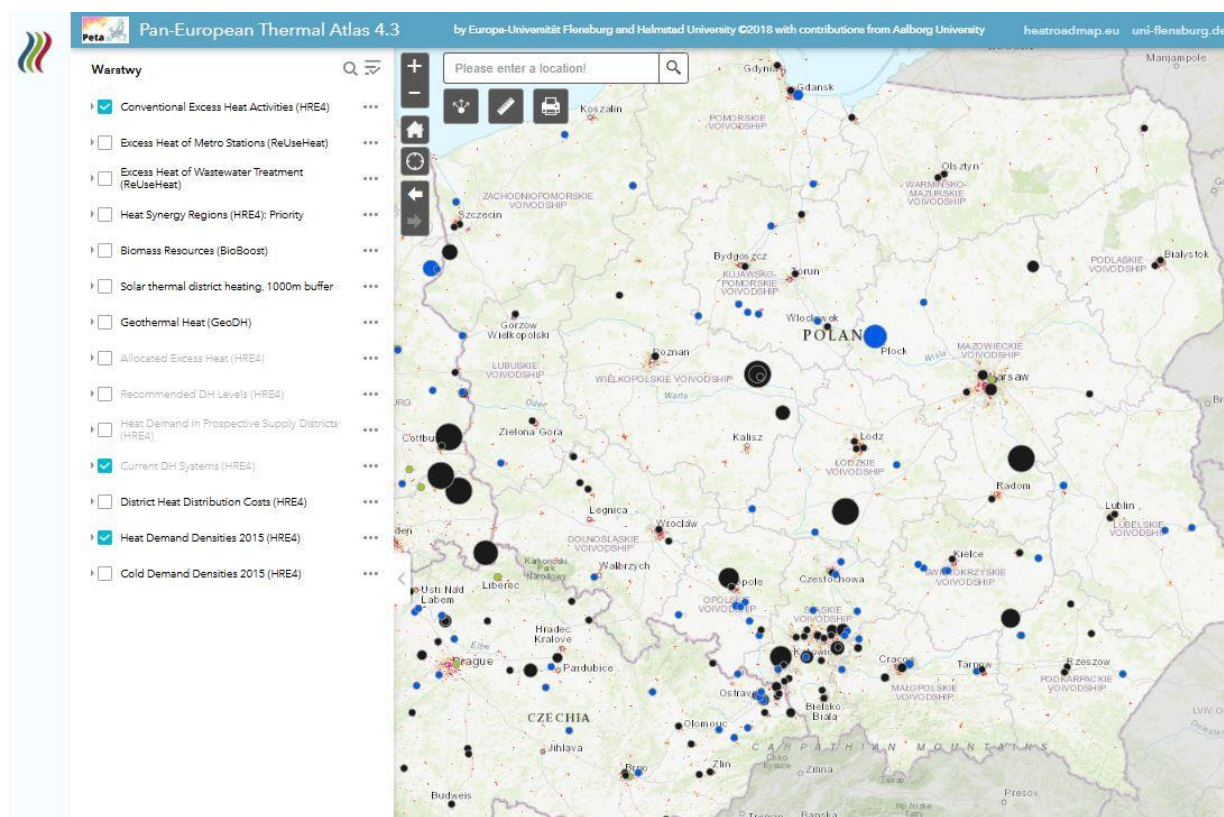
**Rysunek 88 Schemat gromadzenia danych archiwalnych i wyników badań lokalizacyjnych**

Poniżej opisano etapy służące do oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła oraz rodzaje badań lokalizacyjnych.

## 8.1. Przegląd lokalizacji

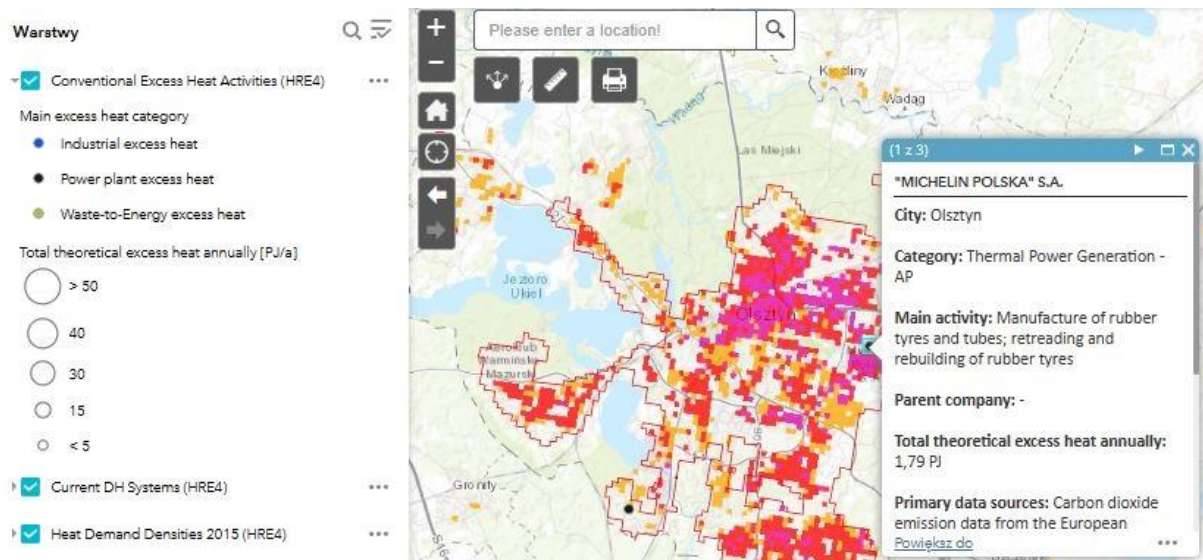
**Etap I - Przegląd lokalizacji** polega na przeglądzie dostępnych danych dotyczących obiektów z nadwyżką energii cieplnej. Przegląd może uwzględniać również obiekty z nadwyżką energii elektrycznej<sup>4</sup>. W efekcie prac zostają wskazane lokalizacje obiektów z nadwyżką energii cieplnej (ewentualnie elektrycznej), czyli **potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów ciepła**.

W tym celu należy zapoznać się z ogólnodostępnymi danymi dotyczącymi obiektów z nadwyżką energii np. danymi zgromadzonymi w bazie danych projektu HeatRoadMap oraz ReUseHeat, udostępnionych na portalu <https://heatroadmap.eu/peta4/> w postaci przeglądarki „Pan-European Thermal Atlas 5.2” (Rysunek 89, Rysunek 90) (PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018) oraz uwzględnić inne czynniki, które należy rozważyć w zależności od celu oceny.



**Rysunek 89** Przeglądarka Pan-European Thermal Atlas 4.3, warstwy obiektów z nadwyżkami energii, zasięgami sieci ciepłowniczych oraz zapotrzebowaniem na ciepło (<https://heatroadmap.eu/peta4/>; PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018)

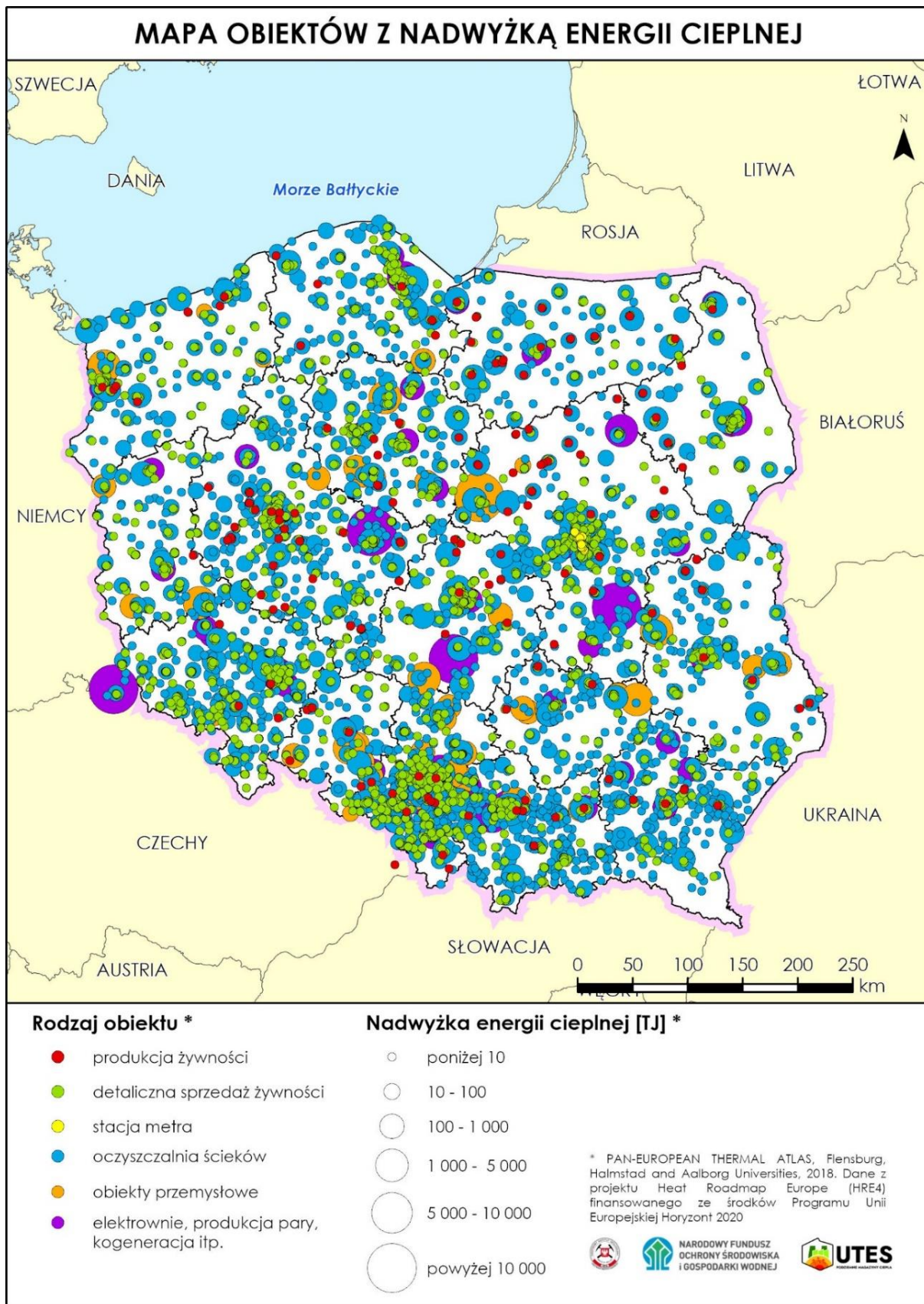
<sup>4</sup> Na potrzeby oceny lokalizacji nie uwzględniono tego rodzaju obiektów z uwagi na brak ogólnodostępnych danych w tym zakresie



**Rysunek 90** Szczegóły przykładowego obiektu z nadwyżką energii, znajdującego się w zasięgu sieci ciepłowniczej oraz obszary z zapotrzebowaniem na ciepło (na podstawie danych ze strony <https://heatroadmap.eu/peta4>, PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018)

Na potrzeby wskazania potencjalnych lokalizacji pod kątem oceny ich przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła wykorzystano dane udostępnione na portalu <https://heatroadmap.eu/peta4/> w postaci przeglądarki „Pan-European Thermal Atlas 5.2” (PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018). W pierwszej fazie z portalu pobrano szczegółowe dane dotyczące wszystkich obiektów z nadwyżką energii cieplnej. Następnie odrzucono obiekty z nadwyżką energii cieplnej znajdujące się poza zasięgiem sieci ciepłowniczych. W ten sposób otrzymano 5 088 potencjalnych lokalizacji podziemnych magazynów ciepła. Lokalizacje obiektów przedstawiono na mapie w podziale na rodzaj obiektu i wielkość nadwyżek energii cieplnej (Rysunek 91).

Lokalizacje obiektów z nadwyżką energii cieplnej przedstawione na mapie (Rysunek 91) sklasyfikowano jako **potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów ciepła**. Lokalizacje te stanowiły podstawę do przeprowadzenia kolejnych prac w zakresie wyboru lokalizacji pod kątem oceny ich przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła.



**Rysunek 91** Mapa obiektów z nadwyżką energii cieplnej (na podstawie danych ze strony <https://heatroadmap.eu/peta4>, PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018)

## 8.2. Wybór lokalizacji

**Etap II - Wybór lokalizacji** obejmuje selekcję lokalizacji obiektów z nadwyżką energii cieplnej wskazanych na etapie Przeglądu lokalizacji z uwagi na różne czynniki określone indywidualnie, w zależności od celu oceny. W efekcie prac zostają wybrane obiekty z nadwyżką energii cieplnej, czyli **potencjalne lokalizacje podziemnych magazynów ciepła do oceny przydatności do budowy**.

Wyboru potencjalnych lokalizacji podziemnych magazynów ciepła do oceny przydatności do budowy dokonano w dwóch fazach. W pierwszej fazie na podstawie ustalonych czynników wytypowano 125 lokalizacji obiektów z nadwyżką energii cieplnej. Wstępna selekcja obiektów z nadwyżką energii cieplnej polegała na:

- odrzuceniu obiektów typu: detaliczna sprzedaż żywności, stacje metra, oczyszczalnie ścieków<sup>5</sup>,
- odrzuceniu obiektów z uwagi na wielkość nadwyżek tj. obiektów z nadwyżkami energii cieplnej > 10 000 TJ<sup>6</sup>,
- odrzuceniu obiektów o niejasnym statusie lub niefunkcjonujących oraz o niepewnej lokalizacji (w tym celu dane z bazy projektu HeatRoadMap Europe oraz ReUseHeat porównano z danymi z Geoportalu Głównego Geodety Kraju oraz danych ze stron internetowych) (Rysunek 92),
- odrzuceniu obiektów w sąsiedztwie których nie ma możliwość zagospodarowania terenu na potrzeby podziemnego magazynu energii np. występuje zwarta zabudowa (w tym celu wykorzystano dane z ortofotomap pochodzących z różnych źródeł).

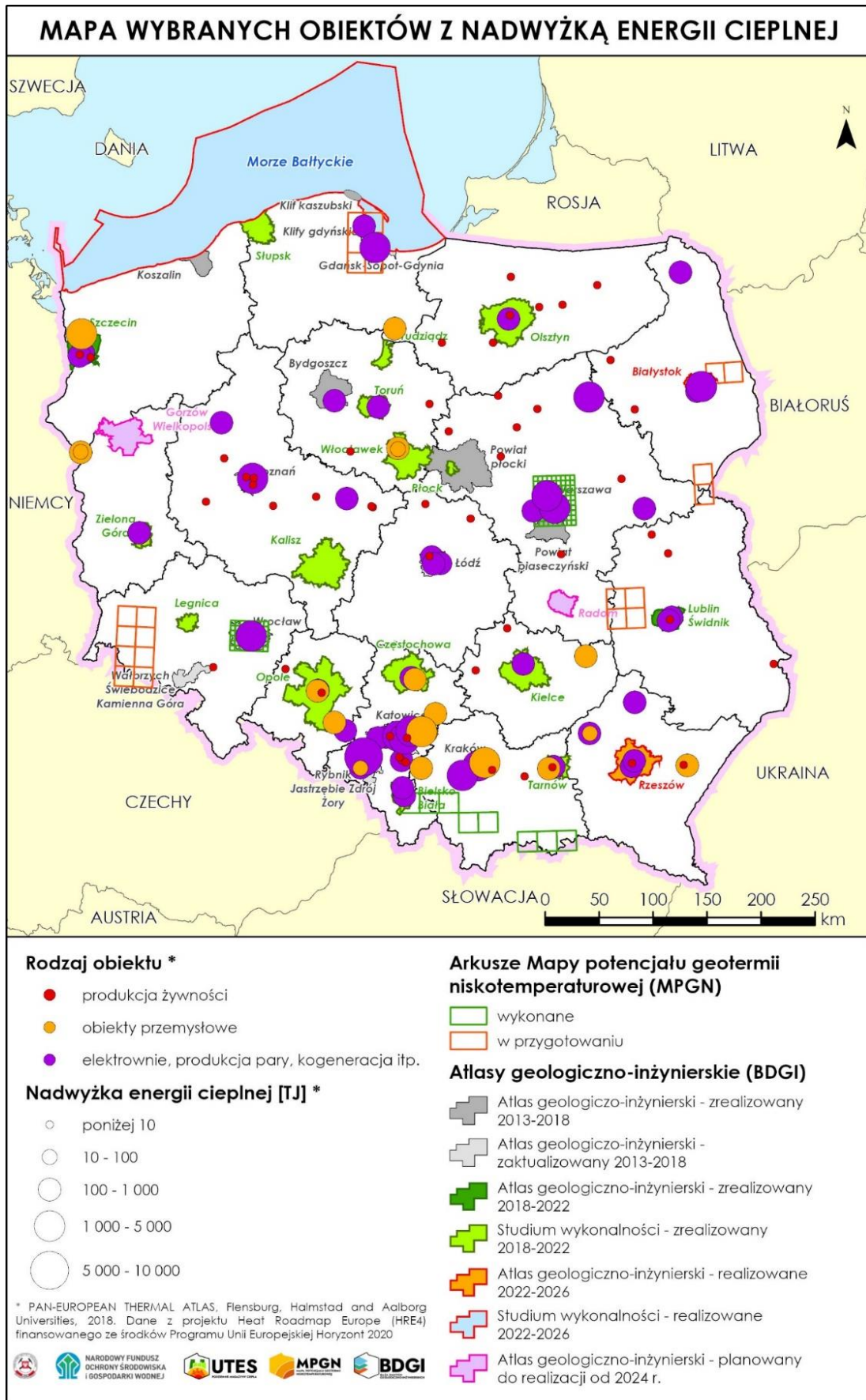
A	B	C	D	E	H	J	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	
OBJECTID	DatasetID	SourceID	DataSource	Category	Classification	CountryCode	QL_PJ	QL_TWh	QL_TJ	QL_GWh	QH_C3_PJ	QH_C3_TWh	QH_C3_TJ	QH_C3_GWh	W_C3_PJ	W_C3_TWh	W_C3_TJ	W_C3_GWh	
1	481	17390	5120	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,966	0,268	965,712	268,233	0,966	0,268	965,712	268,233	0	0	0	0	0
2	482	17397	4659	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	2,063	0,573	2061,718	572,699	2,062	0,573	2061,718	572,699	0	0	0	0	0
3	539	17078	20177	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	10,42	2,894	10 419,509	2894,308	10,42	2,894	10 419,509	2894,308	0	0	0	0	0
4	530	17113	20180	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,186	0,052	185,88	51,633	0,186	0,052	185,88	51,633	0	0	0	0	0
5	531	17132	231	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,077	0,022	77,41	21,503	0,077	0,022	77,41	21,503	0	0	0	0	0
6	532	17320	4949	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,055	0,015	52,883	14,69	0,053	0,015	52,883	14,69	0	0	0	0	0
7	533	17354	6320	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	5,104	0,862	3103,683	862,134	5,104	0,862	3103,683	862,134	0	0	0	0	0
8	534	17355	20181	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,208	0,058	208,049	57,791	0,208	0,058	208,049	57,791	0	0	0	0	0
9	535	17402	6488	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	3,648	1,013	3648,244	1013,401	3,648	1,013	3648,244	1013,401	0	0	0	0	0
10	536	17403	234	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	1,203	0,334	1202,814	334,115	1,203	0,334	1202,814	334,115	0	0	0	0	0
11	537	17404	6471	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,366	0,102	365,814	101,615	0,366	0,102	365,814	101,615	0	0	0	0	0
12	538	17411	6453	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,128	0,036	127,995	35,354	0,128	0,036	127,995	35,354	0	0	0	0	0
13	539	17412	6468	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,349	0,941	348,889	41,302	0,349	0,941	348,889	41,302	0	0	0	0	0
14	540	17413	6470	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,184	0,051	183,945	51,096	0,184	0,051	183,945	51,096	0	0	0	0	0
15	541	17414	4641	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,118	0,033	118,293	32,859	0,118	0,033	118,293	32,859	0	0	0	0	0
16	542	17415	6684	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,181	0,05	181,184	50,329	0,181	0,05	181,184	50,329	0	0	0	0	0
17	543	17416	495	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,947	0,263	947,351	263,153	0,947	0,263	947,351	263,153	0	0	0	0	0
18	544	17417	4109	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	1,708	0,475	1708,337	474,538	1,708	0,475	1708,337	474,538	0	0	0	0	0
19	545	17418	6676	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,792	0,22	792,047	220,013	0,792	0,22	792,047	220,013	0	0	0	0	0
20	546	17419	6451	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,217	0,06	217,425	60,396	0,217	0,06	217,425	60,396	0	0	0	0	0
21	547	17420	5228	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,123	0,034	123,466	34,296	0,123	0,034	123,466	34,296	0	0	0	0	0
22	548	17421	177369	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,075	0,021	74,983	20,829	0,075	0,021	74,983	20,829	0	0	0	0	0
23	549	17422	21118	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,625	0,174	625,36	173,711	0,625	0,174	625,36	173,711	0	0	0	0	0
24	550	17423	21133	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,685	0,19	684,596	190,166	0,685	0,19	684,596	190,166	0	0	0	0	0
25	551	17425	21779	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,08	0,022	79,604	22,112	0,08	0,022	79,604	22,112	0	0	0	0	0
26	552	17426	496	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,145	0,04	145,209	40,336	0,145	0,04	145,209	40,336	0	0	0	0	0
27	553	17427	5103	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,259	0,072	259,357	72,044	0,259	0,072	259,357	72,044	0	0	0	0	0
28	554	17428	6677	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,291	0,081	291,194	80,887	0,291	0,081	291,194	80,887	0	0	0	0	0
29	555	17429	20707	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,924	0,257	924,055	256,682	0,924	0,257	924,055	256,682	0	0	0	0	0
30	556	17430	193099	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,066	0,018	65,922	18,312	0,066	0,018	65,922	18,312	0	0	0	0	0
31	557	17431	5121	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,156	0,043	156,08	43,356	0,156	0,043	156,08	43,356	0	0	0	0	0
32	558	17432	20771	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,12	0,033	120,36	33,433	0,12	0,033	120,36	33,433	0	0	0	0	0
33	559	17433	6474	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,109	0,03	109,489	30,414	0,109	0,03	109,489	30,414	0	0	0	0	0
34	560	17434	4675	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,937	0,26	937,29	260,358	0,937	0,26	937,29	260,358	0	0	0	0	0
35	561	17435	71088	Heat Roadmap Europe 4	Industrial sites	PL	0,146	0,04	146,008	41,655	0,146	0,04	146,008	41,655	0	0	0	0	0

**Rysunek 92** Baza danych projektu HeatRoadMap Europe oraz ReUseHeat, dostępna na stronie <https://heatroadmap.eu/peta4/> (PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018)

Lokalizację wstępnie wyznaczonych obiektów z nadwyżką energii cieplnej do oceny przydatności do budowy magazynów ciepła przedstawiono na mapie w podziale na rodzaj obiektu i wielkość nadwyżek energii cieplnej (Rysunek 93).

<sup>5</sup> Detaliczna sprzedaż żywności została odrzucona ze względu na to, że większość podanych w projekcie lokalizacji tego typu jest małoskalowa, z niewielkimi nadwyżkami energii. Stacje metra zostały odrzucone ze względu na brak możliwości porównania różnych warunków geologicznych w skali kraju. Oczyszczalnie ścieków odrzucono ze względu na możliwość implementacji innych technologii, bardziej korzystnych dla tego typu obiektów (np. bezpośredni odzysk ciepła ze ścieków przy wykorzystaniu pomp ciepła).

<sup>6</sup> Obiekty w Polsce, które wykazują nadwyżki energii cieplnej powyżej 10 000 TJ rocznie, to głównie elektrownie produkujące wyłącznie energię elektryczną, a nie ciepło użytkowe (jak elektrociepłownie). Nie są one włączone w systemy ciepłownicze i nie dostarczają ciepła na potrzeby komunalne czy przemysłowe.



**Rysunek 93** Mapa wybranych obiektów z nadwyżką energii cieplnej (na podstawie danych ze strony <https://heatroadmap.eu/peta4/>; PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018, Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej, Atlasów geologiczno-inżynierskich)

W drugiej fazie spośród 125 lokalizacji obiektów z nadwyżką energii cieplnej wyznaczono 25 potencjalnych lokalizacji do oceny przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła. Ostateczna selekcja obiektów z nadwyżką energii cieplnej do oceny przydatności polegała na uwzględnieniu:

- względnie równomiernego rozmieszczenia na obszarze Polski (położenie na obszarze wszystkich województw),
- dostępności danych geologicznych w tym dostępności danych zgromadzonych w ramach zadań państwowej służby geologicznej pn. „Ocena potencjału energetycznego i uwarunkowań środowiskowych dla wsparcia zrównoważonego rozwoju geotermii niskotemperaturowej”, „Mapa potencjału geotermii niskotemperaturowej Polski (MPGN) w skali 1:50 000. Etap I - zadanie ciągłe” oraz „Prowadzenie i aktualizacja Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich (BDGI) oraz Właściwości Fizycznych i Mechanicznych gruntów i skał (BDGI-WFM) wraz ze sporządzeniem Atlasów geologiczno-inżynierskich wybranych obszarów kraju w skali 1:10 000 (zadanie ciągłe)” (Rysunek 93),
- zróżnicowania pod względem warunków fizjograficznych (Solon i in., 2018) i geomorfologicznych (wykorzystano ortofotomapy, numeryczne modele terenu i szkice geomorfologiczne SMGP),
- regionalizacji geologiczno-inżynierskiej (Rysunek 94) (Majer, Sokołowska, Frankowski (red.) i in., 2018), w tym zróżnicowania pod względem geologicznym i hydrogeologicznym oraz występowania niekorzystnych zjawisk geologicznych.

Lokalizację wyznaczonych obiektów z nadwyżką energii cieplnej do oceny przydatności do budowy magazynów ciepła przedstawiono na mapie w podziale na rodzaj obiektu i wielkość nadwyżek energii cieplnej (Rysunek 95).



### Objaśnienia

- granica nadregionu
- - - granica regionu

#### Obszar gruntów i skał

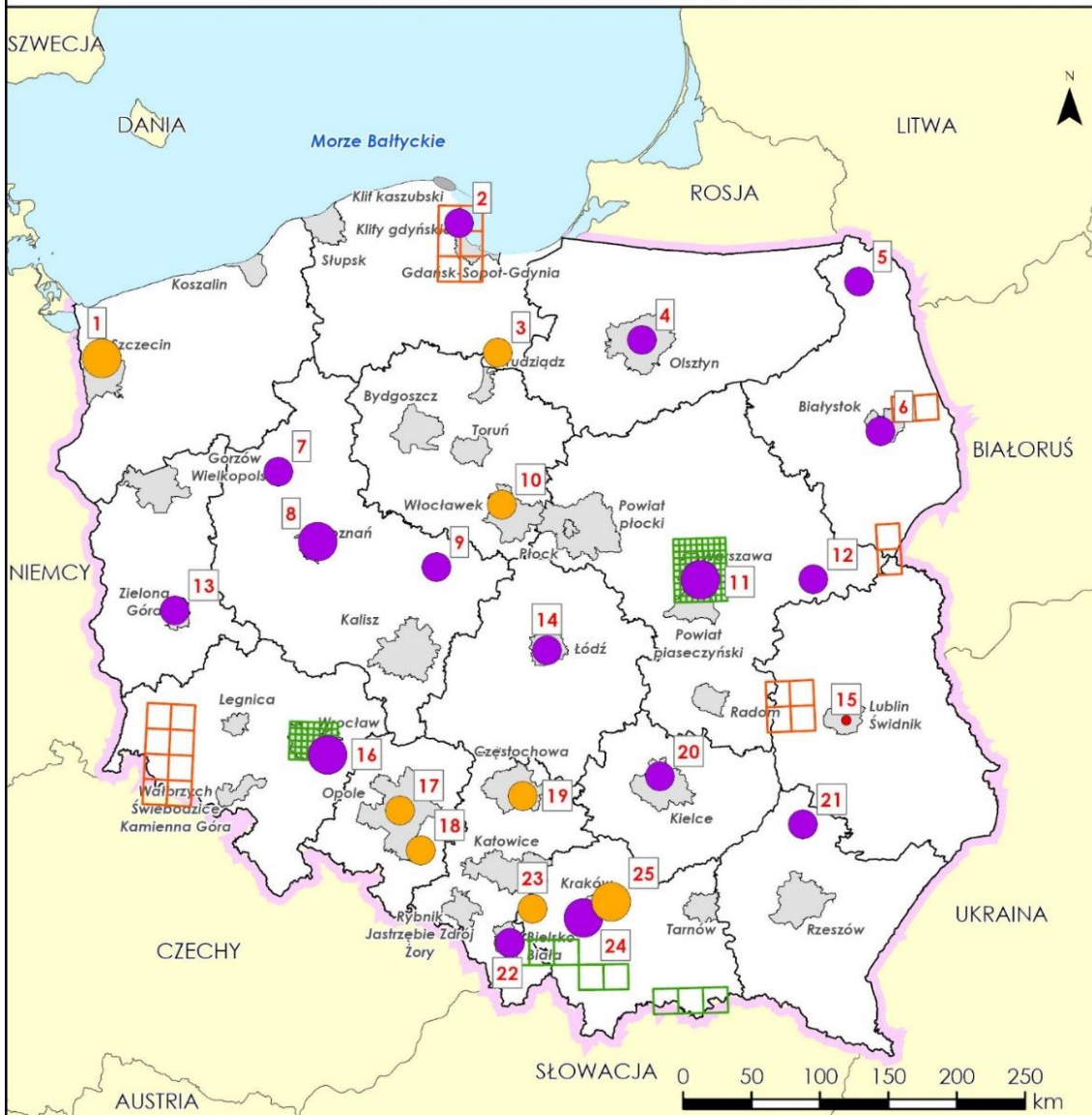
- obszar gruntów antropogenicznych
- obszar gruntów organicznych
- obszar gruntów piaszczystych i mąd dolin rzecznych
- obszar gruntów morskich
- obszar gruntów piaszczystych lodowcowych, wodnolodowcowych i innych
- obszar glin zwałowych zlodowacenia północnopolskiego
- obszar glin zwałowych zlodowacenia środkowopolskiego
- obszar glin zwałowych zlodowacenia południowopolskiego
- obszar gruntów zastoiskowych i jeziornych
- obszar lessów i gruntów lessopodobnych
- obszar gruntów eolicznych i wydmowych
- obszar koluwiów osuwiskowych
- obszar skał twardych
- obszar skał nierozdzielonych z uwagi na wytrzymałość
- obszar skał miękkich

#### Region geologiczno-inżynierski

- 1 - Nadregion Nizu
- 1a - Region zlodowaceń północnopolskich fazy pomorskiej
- 1b - Region zlodowaceń północnopolskich zlodowacenia wisty
- 1c - Region zlodowaceń środkowopolskich zlodowacenia warty
- 1d - Region zlodowaceń środkowopolskich zlodowacenia odry
- 2 - Nadregion Wyżyn
- 2a - Region Wyżyny Lubelskiej
- 2b - Region Wyżyny Małopolskiej
- 2c - Region Wyżyny Śląsko-Krakowskiej
- 3 - Nadregion Przedgórzy
- 3a - Region Pogórza Karpackiego
- 3b - Region Przedgórza Sudeckiego
- 4 - Nadregion Gór
- 4a - Region Gór Świętokrzyskich
- 4b - Region Karpat
- 4c - Region Sudetów

**Rysunek 94 Regionalizacja geologiczno-inżynierska (Majer, Sokolowska, Frankowski (red.) i in., 2018)**

## MAPA OBIEKTÓW Z NADWYŻKĄ ENERGII CIEPLNEJ WSKAZANYCH DO OCENY PRZYDATNOŚCI DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA



### Rodzaj obiektu \*

- produkcja żywności
- obiekty przemysłowe
- elektrownie, produkcja pary, kogeneracja itp.

### Nadwyżka energii cieplnej [TJ] \*

- poniżej 10
- 10 - 100
- 100 - 1 000
- 1 000 - 5 000

13 numer lokalizacji wybranej do oceny

### Arkusze Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej (MPGN)

- wykonane
- w przygotowaniu

### Atlasy geologiczno-inżynierskie (BDGI)

- obszary zrealizowanych i planowanych atlasów oraz studiów geologiczno-inżynierskich

\* PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, Flensburg, Halmstad and Aalborg Universities, 2018. Dane z projektu Heat Roadmap Europe (HRE4) finansowanego ze środków Programu Unii Europejskiej Horyzont 2020



NARODOWY FUNDUSZ  
OCHRONY ŚRODOWISKA  
I GOSPODARKI WODNEJ



UTES



MPGN



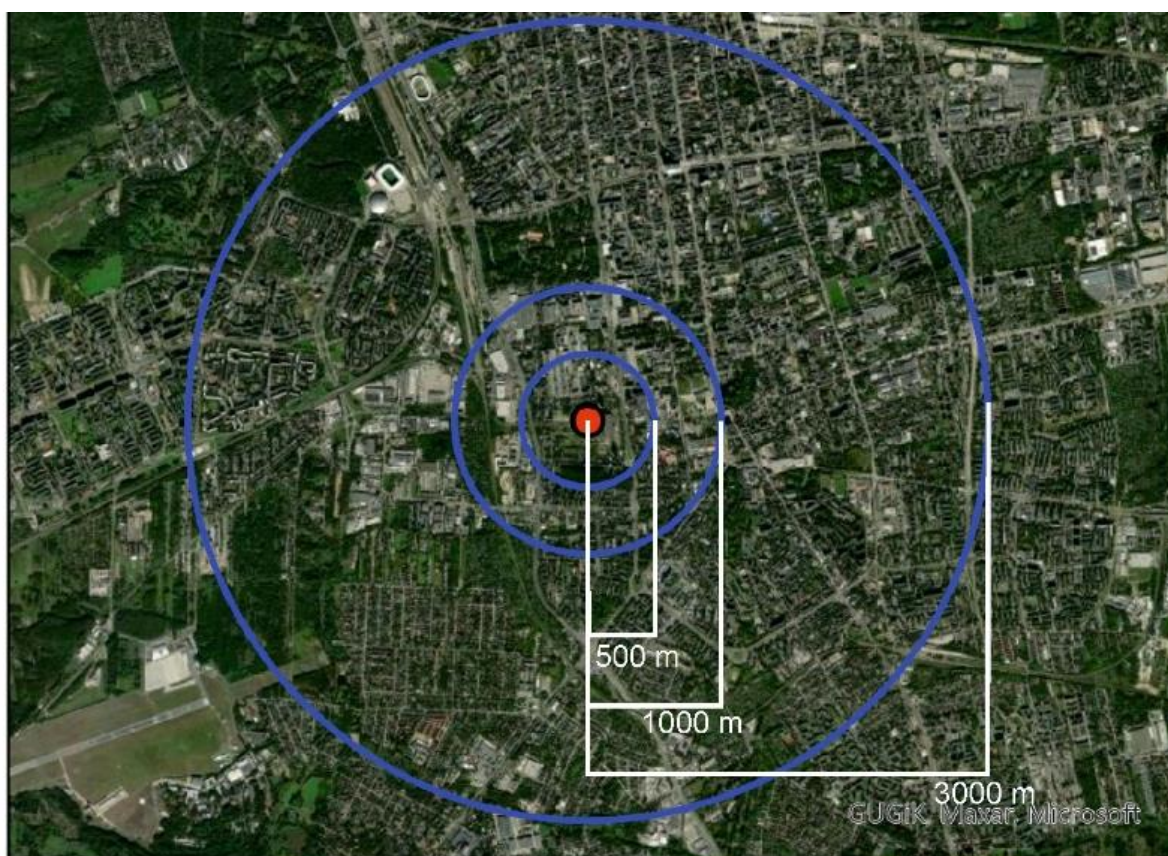
BDGI

**Rysunek 95** Mapa obiektów z nadwyżką energii cieplnej wskazanych do oceny przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła (na podstawie danych ze strony <https://heatroadmap.eu/peta4/>, PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018, Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej, Atlasów geologiczno-inżynierskich)



### 8.3. Wstępna charakterystyka lokalizacji

**Etap III – Wstępna charakterystyka lokalizacji** polega na opisie wszystkich wskazanych potencjalnych lokalizacji do oceny przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła. Wstępną charakterystykę wybranych potencjalnych lokalizacji magazynów ciepła prowadzi się na podstawie danych archiwalnych i wizji lokalnej, ewentualnie można wykonać wstępne badania lokalizacyjne z uwagi np. na brak danych. W przypadku realizowanego zadania charakterystyka opierała się na danych archiwalnych. Na podstawie opisów opracowuje się ocenę przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła. W efekcie zostaje sporządzony ranking potencjalnych lokalizacji przydatnych do budowy podziemnych magazynów ciepła. Na podstawie wyników wykonanych prac, przeprowadzonej oceny przydatności oraz sporządzonego rankingu lokalizacji można podjąć decyzję o kontynuacji prac na lokalizacji w tym podjęciu prac projektowych i budowlanych.

Po wytypowaniu lokalizacji należy dokonać wyboru wielkości analizowanego terenu. Rozmiar terenu może zależeć od takich czynników, jak wielkość nadwyżek energii, wstępna ocena dostępności terenu oraz wymagania techniczne dotyczące maksymalnych odległości przesyłu ciepła między źródłem a magazynem lub magazynem a odbiorcami. Na potrzeby opracowania wybrano bufor od centrum źródła nadwyżek o promieniu 1 000 m, ze względu na ilość dostępnych danych oraz w celach równego porównania różnych lokalizacji. Bufor ten może być modyfikowany, w zależności od potrzeb analizy (Rysunek 96). Kolejne analizy należy wykonywać w wyznaczonym buforze.



#### Objaśnienia

-  Źródło nadwyżki
-  Bufor

Rysunek 96 Dobór buforu do oceny terenu

Po wyborze buforu należy ustalić głębokość, do której zostanie oceniony górotwór. Głębokość zależy od analizowanej instalacji, dostępnych danych archiwalnych oraz założeń projektowych. Na potrzeby opracowania złożono, że górotwór (ośrodek gruntowo-skalny, podłoże) należy, w zależności od technologii magazynowania, wstępnie ocenić do głębokości:

- 300 m p.p.t. w przypadku BTES (w przypadku braku danych do głębokości nie mniejszej niż 100 m p.p.t.),
- 30 m p.p.t. w przypadku EF (TG),
- 15 m p.p.t. w przypadku PTES i TTES.

Dalsze prace dotyczące wstępnej charakterystyki lokalizacji podziemnych magazynów ciepła polegają na (Majer, Ryżyński (red.) i in., 2022, zmienione):

- pozyskaniu danych archiwalnych z dostępnych źródeł zewnętrznych i wewnętrznych,
- zgromadzeniu i przechowywaniu danych w cyfrowej bazie danych,
- wykonaniu badań lokalizacyjnych,
- przetwarzaniu danych i wyników badań lokalizacyjnych,
- ocenie lokalizacji,
- sporządzeniu rankingu lokalizacji,
- archiwizowaniu i aktualizacji danych.

### **8.3.1.Przegląd danych archiwalnych**

Podczas tego etapu prac należy zebrać i zapoznać się ze wszystkimi dostępnymi materiałami dotyczącymi budowy geologicznej terenu, uwarunkowań geomorfologicznych, hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich oraz innymi dostępnymi źródłami, pozwalającymi na charakterystykę lokalizacji pod kątem możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze. Dane źródłowe należy pobierać bezpośrednio od podmiotów będących ich dysponentami, co zapewnia aktualność i gwarantuje ich referencyjność (Majer, Sokołowska (red.) i in., 2023). Część danych wymaga wystąpienia z wnioskiem o ich udostępnienie. Znaczna część danych dostępna jest bezpłatnie na portalach internetowych:

- <https://geologia.pgi.gov.pl/>;
- <https://www.geoportal.gov.pl/>;
- <https://geoserwis.gdos.gov.pl/>;
- [https://wody.isok.gov.pl/imap\\_kzgw/](https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/);
- <https://bdot10k.geoportal.gov.pl/>;
- <https://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web>.

W opracowaniu, jako dane źródłowe, uwzględniono poniższe dane archiwalne:

- Ortofotomapy,
- Numeryczny Model Terenu,
- Budynki, budowle i urządzenia,
- Klasyfikacja wg programu CORINE Land Cover (CLC),
- Strefa ochrony ujęć wód podziemnych pośrednich i bezpośrednich,
- Obszary ochrony przyrody,
- Tereny i obszary górnicze,
- Występowanie złóż,
- Obszary zarejestrowane w Systemie Osłony Przeciwośliskowej,
- Obszary podtopień, obszary zagrożone powodzią, mokradła,

- Obszary o potencjalnym występowaniu gruntów organicznych i antropogenicznych,
- Składowiska,
- Wody powierzchniowe,
- Otwory wiertnicze,
- Mapy potencjału geotermii niskotemperaturowej.

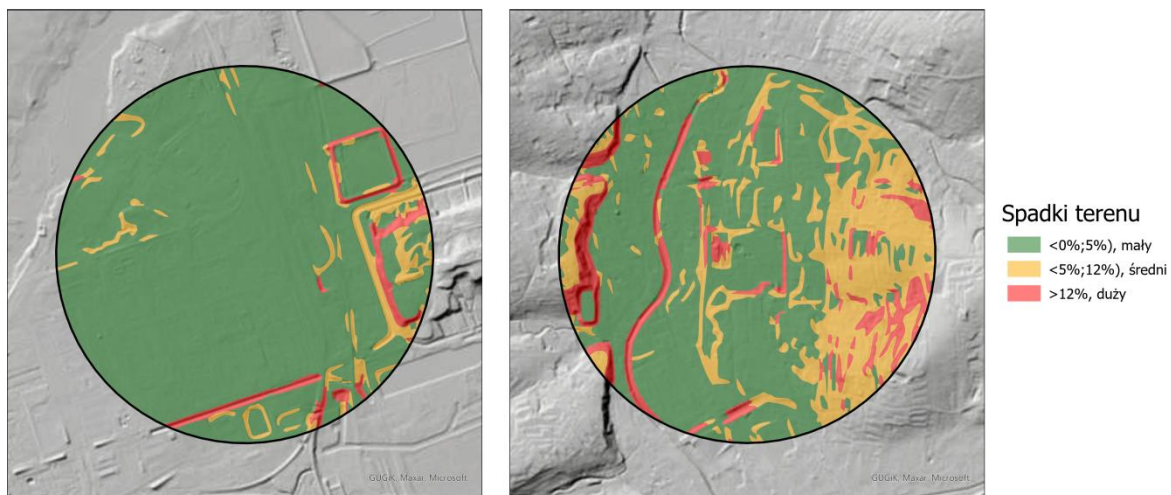
Zgromadzone dane (najlepiej w wersji wektorowej) należy umieścić w bazie danych (rozdział 8.6).

### 8.3.2.Przetwarzanie danych

Po zgromadzeniu danych archiwalnych w bazie danych należy przeprowadzić odpowiednie analizy geostatystyczne i przestrzenne. Wynikiem tych prac są tematyczne warstwy informacyjne GIS, tworzące warstwy do charakterystyki potencjalnych lokalizacji magazynów energii cieplnej. Warstwy obejmują zebrane dane archiwalne (rozdział 8.3.1), oraz dodatkowe dane będące efektem przetwarzania danych oraz ich parametryzacji, przycięte do wyznaczonego buforu, w tym następujące mapy:

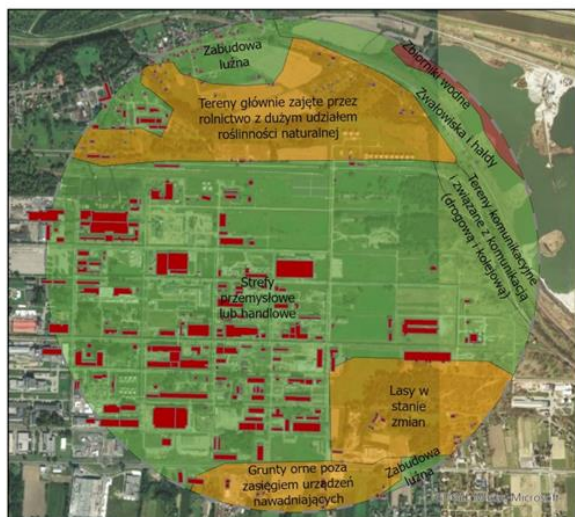
- mapa spadków powierzchni terenu (Rysunek 97),
- mapa poligonowa przewodności termicznej wykonana na podstawie sparametryzowanych płytkich otworów (mapy do głębokości 2, 5, 10 i 15 m p.p.t.),
- mapa poligonowa oporności termicznej wykonana na podstawie sparametryzowanych płytkich otworów (mapy na głębokościach 1, 2 i 3 m p.p.t.),
- mapa punktowa średniej przewodności termicznej w profilu wykonana na głębszych otworach (mapy do głębokości do 10, 15, 30, 40, 50, 70, 100, 130, 150, 200, 250 i 300 metrów p.p.t.),
- mapa punktowa średniej objętościowej pojemności cieplnej w profilu wykonana na głębszych otworach (mapy na głębokościach do 10, 15, 30, 40, 50, 70, 100, 130, 150, 200, 250 i 300 metrów p.p.t.),
- mapa klas CORINE z przydzielonymi ocenami przydatności terenu dla magazynów ciepła zbiornikowych,
- mapa klas CORINE z przydzielonymi ocenami przydatności terenu dla magazynów ciepła otworowych (Rysunek 98).

Metodyka wykonywania map kropkowych średniej przewodności termicznej oraz map poligonowych przewodności i oporności termicznej została przedstawiona w Kłonowski i in. (2020), Ryżyński i in. (2023) oraz Żeruń i in. (2024).

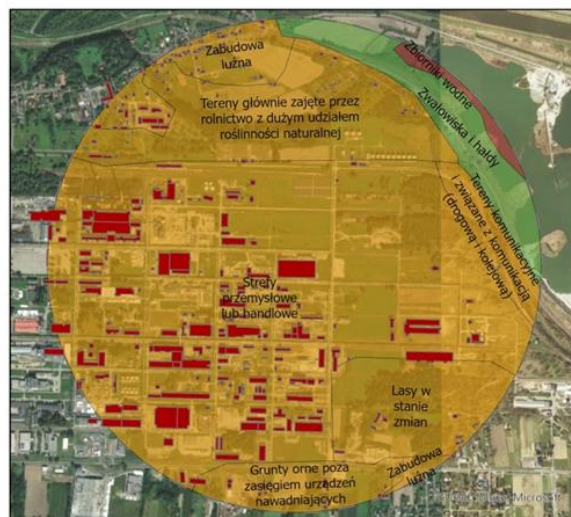


Rysunek 97 Przykładowe mapy spadków powierzchni terenu

analiza dla magazynów typu BTES, EF

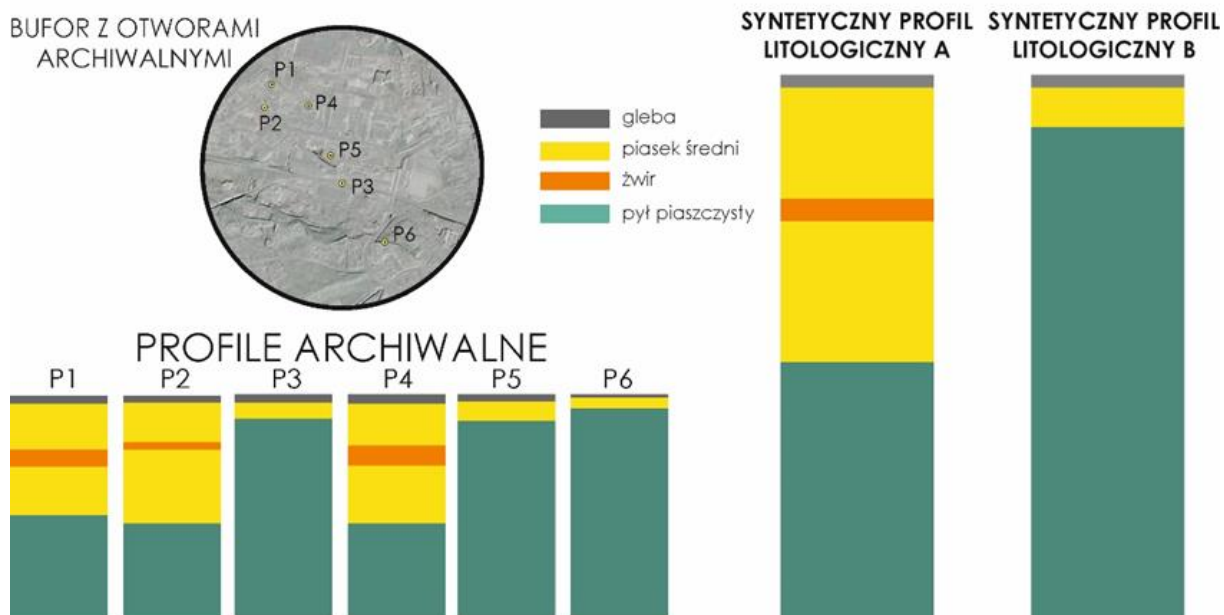


analiza dla magazynów typu PTES, TTES



**Rysunek 98 Klasy CORINE w podziale na oceny w zależności od rodzaju magazynu ciepła**

Kolejnym etapem jest opracowanie syntetycznego profilu litologicznego, opartego na dostępnych profilach, mapach geologicznych oraz opracowaniach archiwalnych (Rysunek 99).

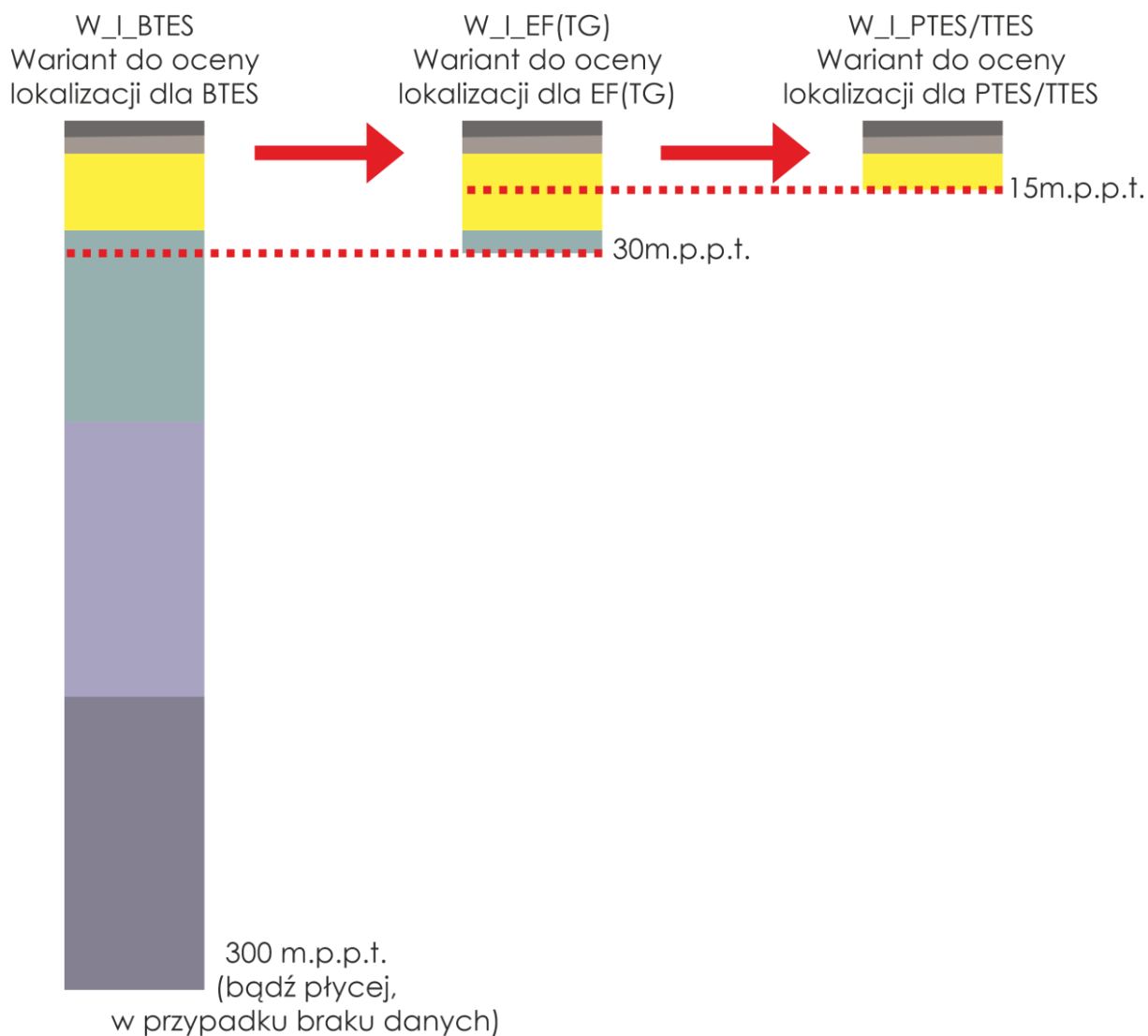


**Rysunek 99 Schemat przygotowania syntetycznych profili litologicznych na podstawie danych archiwalnych**

Proces ten obejmuje także analizę parametrów poszczególnych wydzieleń profili, takich jak warunki hydrogeologiczne, właściwości fizyczne, mechaniczne i termiczne. Na potrzeby opracowania założono głębokość profilu w zależności od rodzaju magazynu ciepła (Tabela 52, Rysunek 100).

**Tabela 52 Głębokość opracowania syntetycznego profilu litologicznego w zależności od technologii**

Rodzaj technologii (magazynu ciepła)	Głębokość syntetycznego profilu
BTES – Otworowy magazyn ciepła	Wstępnie do 300 m p.p.t., w przypadku braku danych do rozpoznanej głębokości nie mniejszej niż 100 m p.p.t.
PTES/TTES – Magazyn ciepła w specjalnie wykonanym zbiorniku przypowierzchniowym bądź podziemnym	Do 30 m p.p.t.
EF(TG) – Fundamenty energetyczne (dot. przede wszystkim termopali)	Do 15 m p.p.t.



**Rysunek 100 Schemat wariantów głębokościowych syntetycznych profili litologicznych**

Syntetyczne profile litologiczne przedstawiają uwarunkowania geologiczne na obszarze analizowanego bufora. W przypadku obszaru o większej zmienności geologicznej czy geomorfologicznej, dla lokalizacji wyznacza się kilka możliwych syntetycznych profili litologicznych charakteryzujących zmienność warunków geologicznych w podłożu potencjalnej lokalizacji podziemnego magazynu ciepła.

Ze względu na skalę opracowania i głębokości analizy, syntetyczne profile litologiczne nie są przypisane do wyznaczonego punktu bądź wydzielonego obszaru na powierzchni bufora. Precyzyjne wyznaczenie granic zmienności litologicznej na podstawie danych archiwalnych wymagałoby konstrukcji modelu 3D w skali odpowiadającej opracowaniu. Konstrukcja geologicznego modelu 3D jest procesem pracochłonnym i długotrwałym, zasadnym do wykonania na etapie szczegółowej analizy przydatności danego obszaru. Mając na uwadze charakter opracowania, tj. przygotowanie metodyki umożliwiającej seryjną i względnie szybką wstępną ocenę lokalizacji pod kątem podziemnego magazynowania ciepła zdecydowano, że liczba profili oraz ich zróżnicowanie stanowią wystarczające narzędzie do oceny stopnia skomplikowania budowy geologicznej i pozwalają ocenić różnorodność warunków geologicznych możliwych do zastania na danym terenie.

W przypadku konkretnego projektu instalacji, bądź przy ograniczonych zasobach archiwalnych, głębokość i liczba profili syntetycznych może ulec zmianie.

Po zebraniu danych, ich przetworzeniu, opracowaniu map i syntetycznych profili litologicznych należy opisać i ocenić przydatność lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła.

### **8.3.3. Opis i ocena lokalizacji**

W celu przeprowadzenia oceny lokalizacji w pierwszej kolejności należy opisać lokalizację, a następnie przeprowadzić ocenę lokalizacji.

Charakterystykę lokalizacji można przeprowadzić na zaproponowanej Karcie lokalizacji podziemnego magazynu ciepła. Karta łączy charakterystykę geologiczną lokalizacji, opartą o kryteria opisane w rozdziale 7, z informacjami na temat zagospodarowania terenu, dokumentacją fotograficzną oraz opisem zakresu wykonanych badań.

Karta lokalizacji podziemnego magazynu ciepła powinna obejmować:

- informacje o etapie inwestycji,
- lokalizację ocenianego obszaru (mapa na podkładzie ortofotomapy z elementami ewidencyjnymi),
- mapę przedstawiającą występowanie wód powierzchniowych,
- informacje o zagospodarowaniu terenu (obszary chronione, pokrycie terenu, zabudowa, infrastruktura naziemna i podziemna) oraz dokumentację fotograficzną. Informacje należy czerpać z danych zebranych podczas wizji terenowych oraz danych ogólnodostępnych,
- mapę podziału obszaru na klasy CORINE (wg rozdziału 6.5) (<https://clc.gios.gov.pl/index.php/o-clc/legenda>),
- przewidywane syntetyczne profile geologiczne,
- charakterystykę kryteriów geologicznych (wg rozdziału 7) powierzchniowych oraz dotyczących poszczególnych profili syntetycznych,
- informację na temat zakresu wykonanych badań,
- ocenę przydatności lokalizacji do budowy magazynu ciepła (ocena punktowa wynika z obliczeń podanych na Karcie oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnego magazynu ciepła).

Przykład karty lokalizacji podziemnego magazynu ciepła przedstawiono poniżej.

# KARTA LOKALIZACJI PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA\*

## NUMER EWIDENCYJNY

Numer w bazie GITES	Województwo	Rodzaj magazynu	Numer arkusza SMGP	Numer regionu geologiczno-inżynierskiego
6	PL	UTES	339	1c

Rodzaj magazynu: UTES (wszystkie), BTES, PTES, TTES, EF(TG)

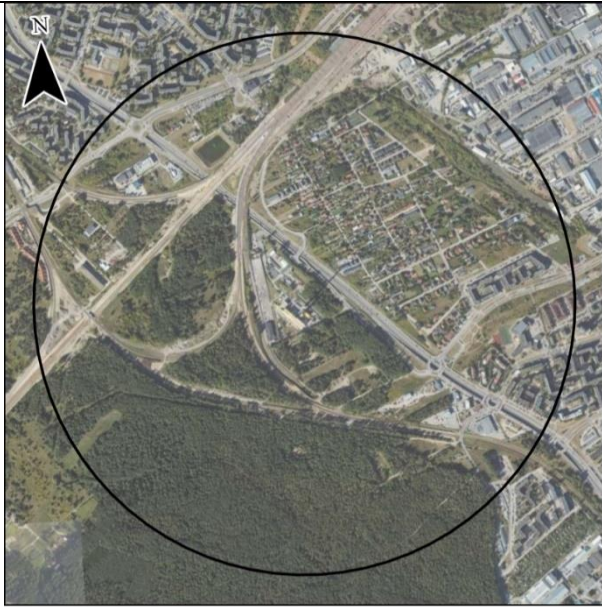
Województwo (kod): DŚ: dolnośląskie, KP: kujawsko-pomorskie, LB: lubelskie, LS: lubuskie, ŁD: łódzkie, MP: małopolskie, MZ: mazowieckie, MB: Morze Bałtyckie, OP: opolskie, PK: podkarpackie, PL: podlaskie, PM: pomorskie, ŚL: śląskie, ŚK: świętokrzyskie, WM: warmińsko-mazurskie, WP: wielkopolskie, ZP: zachodnio-pomorskie.

**KOD: 6\_PL\_UTES\_339\_1c**

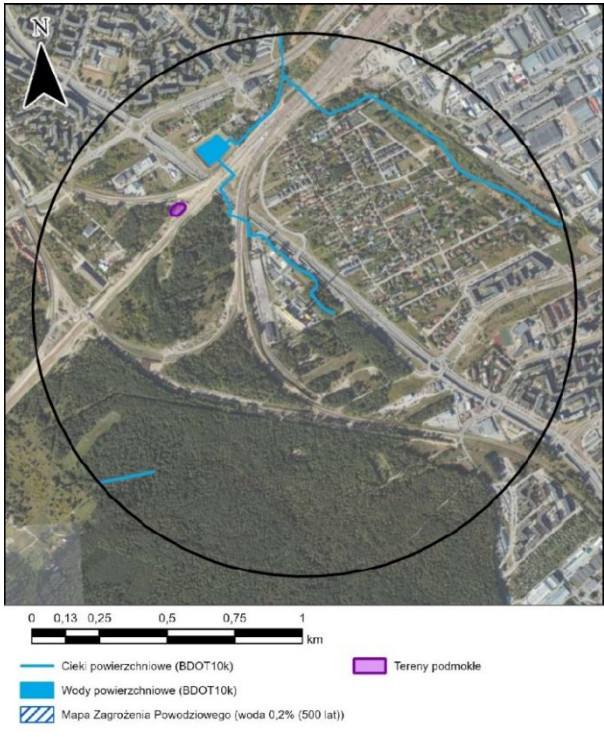
### 1. ETAP INWESTYCJI

Wstępna ocena przydatności	Studium/Koncepcja	Projektowanie	Budowa
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE

### 2. LOKALIZACJA

Numer ewidencyjny działek (dotyczy etapu projektowania)	Nie dotyczy
Miejscowość	Białystok
Gmina	Białystok
Powiat	białostocki
Województwo	podlaskie
Lokalizacja terenu (podkład na ortofotomapie)	 <p>Współrzędne punktu centralnego X: 774751,48 Y: 590723,44 (PUWG 1992)</p>

### 3. WODY POWIERZCHNIOWE

<p>Występowanie wód powierzchniowych</p>	
<p>Przejawy wód podziemnych na powierzchni terenu</p>	<p>Nie zaobserwowano</p>

### 4. ZAGOSPODAROWANIE TERENU

#### Obszary chronione

Park narodowy	Park krajobrazowy	Rezerwat	Natura 2000	Strefy ochronne	Inne (Jakie?)
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE

#### Pokrycie terenu

Las	Zarośla krzewiaste	Łąki i pastwiska	Grunty orne	Sady	Nieużytki
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE

#### Zabudowa

Mieszkalna	Gospodarcza	Użyteczności publicznej	Przemysłowa	Usługowa	Wojskowa
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE
Zabytkowa	Sakralna	Obiekty archeologiczne	Ślady starej zabudowy	Ogródki działkowe	Inna (Jaka?)
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE

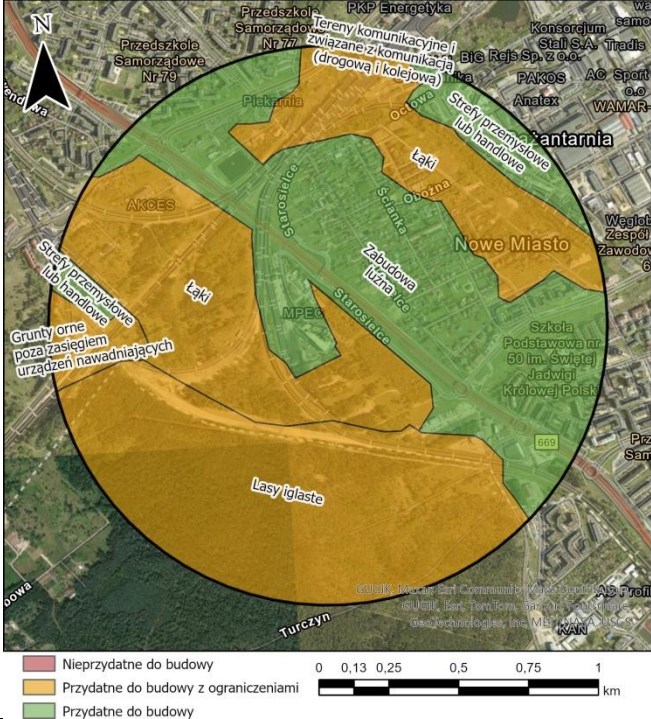
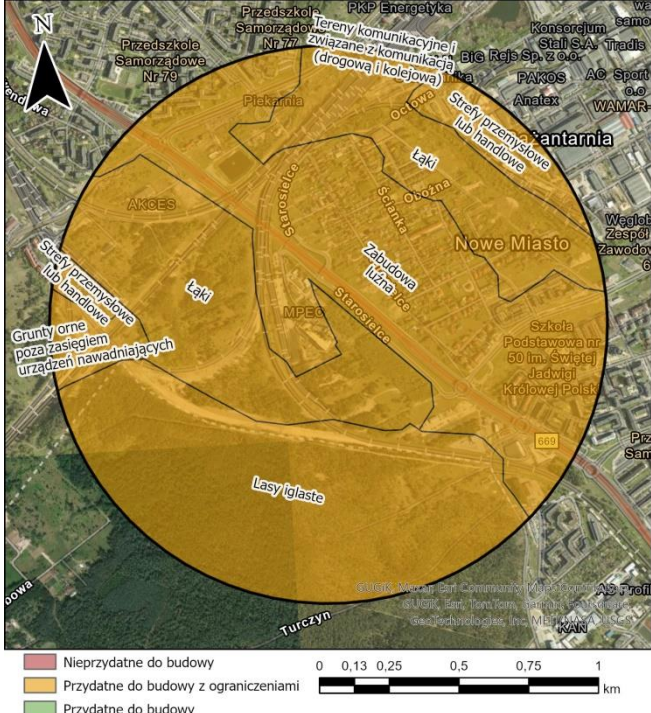
#### Infrastruktura komunalna

Drogi	Linie kolejowe	Lotniska	Place składowe	Linie tramwajowe	Inna (Jaka?)
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE

#### Linie przesyłowe

Linie energetyczne	Linie telefoniczne	Wodociągi	Kanalizacja	Gazociągi	Inne (Jakie?)
TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE	TAK/NIE sieć ciepłownicza

**Klasy CORINE (Tabela 26)**

Technologia magazynu ciepła	Klasy CORINE
BTES/EF(TG)	
PTES/TTES	

## 5. DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA



## 6. UKSZTAŁTOWANIE TERENU

(Rozdział 7.1.) Spadki terenu	75% spadek mały, 17% spadek średni, 8% spadek duży		
(Rozdział 7.2.) Forma geomorfologiczna	Wysoczyzny polodowcowe 38% powierzchni Kemy 24,1% powierzchni Tarasy zalewowe 13% powierzchni Tarasy i równiny wodnolodowcowe 9% powierzchni Zagłębienia polodowcowe 7,9% powierzchni Składowiska i hałdy 5,6% powierzchni Ozy i formy szczelinowe 2,4% powierzchni	<b>BTES/EF(TG)</b>	<b>PTES/TTES</b>
		<b>Udział grupy geomorfologicznej</b>	<b>Udział grupy geomorfologicznej</b>
		A 38 % B 7,9 % C 54,1 %	A 45,9 % B 41,1 % C 13 %

## 7. NIEKORZYSTNE ZJAWISKA I PROCESY GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

### NATURALNE

Niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie – naturalne (Występowanie zagrożeń geologicznych) Rodzaj (Tabela 33)	Nie występują	Mogą potencjalnie wystąpić	Występują
	X		

### ANTROPOGENICZNE

Niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie – antropogeniczne (Występowanie przejawów działalności antropogenicznej) Rodzaj (Tabela 33)	Nie występują	Mogą potencjalnie wystąpić	Występują
	X		

Mapa niekorzystnych zjawisk i procesów geologiczno-inżynierskich	brak
--	------

(Rozdział 7.3.) Procentowy udział możliwych do wystąpienia lub występujących niekorzystnych procesów geologiczno-inżynierskich na obszarze analizy	Występujące	Potencjalne	Pozostały obszar (obszar wolny od niekorzystnych procesów geologiczno-inżynierskich)
	0%	0%	100%

## 8. INNE

(Rozdział 7.4.) Dostępność złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów energii cieplnej	< 20 km
Uwagi	brak

## 9. SYNTETYCZNY PROFIL LITOLOGICZNY

WARIANT_I_BTES						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	2	nasyp	antropogen	0,7%	2	nie
2	8	glina piaszczysta	czwartorzęd	2,0%	6	nie
8	13	piasek drobny	czwartorzęd	1,7%	5	tak
13	23	glina zwałowa	czwartorzęd	3,3%	10	nie
23	41	pył, il, mułek	czwartorzęd	6,0%	18	nie
41	60	glina zwałowa	czwartorzęd	6,3%	19	nie
60	70	piasek drobny	czwartorzęd	3,3%	10	tak
70	95	glina	czwartorzęd	8,3%	25	nie
95	102	piasek i żwir	czwartorzęd	2,3%	7	tak
102	110	glina zwałowa	czwartorzęd	2,7%	8	nie
110	180	piasek glaukonitowy, piasek z węglem brunatnym, mułek i il	paleogen	23,3%	70	tak
180	300	margle i kreda pisząca	kreda	40,0%	120	tak

WARIANT_I_EF(TG)						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	2	nasyp	antropogen	7%	2	nie
2	8	glina piaszczysta	czwartorzęd	20%	6	nie
8	13	piasek drobny	czwartorzęd	17%	5	tak
13	23	glina zwałowa	czwartorzęd	33%	10	nie
23	30	pył, il, mułek	czwartorzęd	23%	7	nie

WARIANT_I_PTES/TTES						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	2	nasyp	antropogen	13,3%	2	nie
2	8	glina piaszczysta	czwartorzęd	40,0%	6	nie
8	13	piasek drobny	czwartorzęd	33,3%	5	tak
13	15	glina zwałowa	czwartorzęd	13,3%	2	nie

WARIANT_II_BTES						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	8	piasek drobny	czwartorzęd	2,7%	8	nie
8	12	piasek drobny	czwartorzęd	1,3%	4	tak
12	13,5	glina pylasta	czwartorzęd	0,5%	1,5	nie

WARIANT_II_BTES						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
13,5	16	piasek drobny	czwartorzęd	0,8%	2,5	tak
16	24	glina piaszczysta	czwartorzęd	2,7%	8	nie
24	40	mułek, ił	czwartorzęd	5,3%	16	nie
40	60	glina zwałowa	czwartorzęd	6,7%	20	nie
60	70	piasek drobny	czwartorzęd	3,3%	10	tak
70	95	glina	czwartorzęd	8,3%	25	nie
95	102	piasek i żwir	czwartorzęd	2,3%	7	tak
102	110	glina zwałowa	czwartorzęd	2,7%	8	nie
110	180	piasek glaukonitowy, piasek z węglem brunatnym, mułek i ił	paleogen	23,3%	70	tak
180	300	margle i kreda pizząca	kreda	40,0%	120	tak

WARIANT_II_EF(TG)						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	8	piasek drobny	czwartorzęd	27%	8	nie
8	12	piasek drobny	czwartorzęd	13%	4	tak
12	13,5	glina pylasta	czwartorzęd	5%	1,5	nie
13,5	16	piasek drobny	czwartorzęd	8%	2,5	tak
16	24	glina piaszczysta	czwartorzęd	27%	8	nie
24	30	mułek, ił	czwartorzęd	20%	6	nie

WARIANT_II_PTES/TTES						
Strop wydzielenia [m p.p.t.]	Spąg wydzielenia [m p.p.t.]	Litologia	Stratygrafia	Procentowy udział w profilu	Miąższość [m]	Warstwa zawodniona [tak/nie]
0	8	piasek drobny	czwartorzęd	53,3%	8	nie
8	12	piasek drobny	czwartorzęd	26,7%	4	tak
12	13,5	glina pylasta	czwartorzęd	10,0%	1,5	nie
13,5	15	piasek drobny	czwartorzęd	10,0%	1,5	tak

## 10. CHARAKTERYSTYKA BUDOWY GEOLOGICZNEJ

### Warunki gruntowe (geologiczne i hydrogeologiczne)

Występowanie odsłoneń	nie
(Rozdział 7.5.) Sezonowe zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych	Ok. 0,7 m

Kryterium	Technologia magazynowania		
	BTES	EF(TG)	PTES/TTES
(Rozdział 7.6.) Jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego	2 profile	2 profile	2 profile

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (technologia BTES)			
	WARIANT_I_BTES	WARIANT_II_BTES	WARIANT_III_BTES	WARIANT_IV_BTES
(Rozdział 7.7) Zwiercalność gruntów i skał	1 zmiana	1 zmiana	-	-
(Rozdział 7.9.) Procentowy udziału utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	28,7%	26,2%	-	-

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (technologia EF(TG))			
	WARIANT_I_EF(TG)	WARIANT_II_EF(TG)	WARIANT_III_EF(TG)	WARIANT_IV_EF(TG)
(Rozdział 7.7) Zwiercalność gruntów i skał	0 zmian	0 zmian	-	-
(Rozdział 7.9) Procentowy udziału utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	77%	52%	-	-

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (PTES/TTES)			
	WARIANT_I_PTES/TTES	WARIANT_II_PTES/TTES	WARIANT_III_PTES/TTES	WARIANT_IV_PTES/TTES
(Rozdział 7.8) Urabialność gruntów i skał	46,7% A, 53,3% B	90% A, 10% C	-	-
(Rozdział 7.9) Procentowy udziału utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	53,3%	10%	-	-
(Rozdział 7.12) Przydatność podłoża na potrzeby budowy podziemnych magazynów energii cieplnej	33,3% A, 53,3% B, 13,4% C	90% A, 10% B	-	-
(Rozdział 7.13) Przydatność gruntów/skał z wykopów do wbudowania w nasyp	46,7% A, 53,3% B	90% A, 10% B	-	-
(Rozdział 7.14) Głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych	8 m p.p.t.	8 m p.p.t.	-	-

Inne/uwagi	brak
------------	------

### Właściwości termiczne

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (BTES)			
	WARIANT_I_BTES	WARIANT_II_BTES	WARIANT_III_BTES	WARIANT_IV_BTES
(Rozdział 7.10.) Średnia przewodność termiczna górotworu	2,22 W/(m*K)	2,16 W/(m*K)	-	-
(Rozdział 7.11.) Średnia objętościowa pojemność cieplna górotworu	2,18 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	2,15 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	-	-

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (EF(TG))			
	WARIANT_I_EF(TG)	WARIANT_II_EF(TG)	WARIANT_III_EF(TG)	WARIANT_IV_EF(TG)
(Rozdział 7.10.) Średnia przewodność termiczna górotworu	2,24 W/(m*K)	2,15 W/(m*K)	-	-
(Rozdział 7.11.) Średnia objętościowa pojemność cieplna górotworu	1,99 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	1,86 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	-	-

Kryterium	Numer syntetycznego profilu litologicznego (PTES/TTES)			
	WARIANT_I_PTES/TTES	WARIANT_II_PTES/TTES	WARIANT_III_PTES/TTES	WARIANT_IV_PTES/TTES
(Rozdział 7.10.) Średnia przewodność termiczna górotworu	2,43 W/(m*K)	2,13 W/(m*K)	-	-
(Rozdział 7.11.) Średnia objętościowa pojemność cieplna górotworu	1,97 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	1,82 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	-	-

Inne/uwagi	brak
------------	------

### 11. ZAKRES WYKONANYCH BADAŃ (STOPIEŃ ROZPOZNANIA TERENU)

Rodzaj badań	Wykonanie	Zakres badań
Analiza materiałów archiwalnych	TAK/NIE	Analiza archiwalnych map, warstw przestrzennych, objaśnień do map
Wizja terenowa	TAK/NIE	Dokumentacja fotograficzna
Kartowanie	TAK/NIE	
Pomiary geodezyjne	TAK/NIE	
Badania geofizyczne	TAK/NIE	
Wiercenia	TAK/NIE	
Sondowania	TAK/NIE	
Badania laboratoryjne	TAK/NIE	
Inne (Jakie?)	TAK/NIE	

### **AUTOR SPORZĄDZAJĄCY KARTĘ**

Imię i nazwisko wypełniającego kartę	Jan Nowak
Kategoria i numer kwalifikacji geologicznych wypełniającego kartę	-
Instytucja reprezentowana przez wypełniającego kartę	Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

### **DATA SPORZĄDZENIA KARTY/DATA AKTUALIZACJI KARTY**

Data sporządzenia karty	15.11.2024
Data aktualizacji karty	20.11.2024

\* - numery rozdziałów oraz numery tabel według opracowania pt. „Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)” (Żeruń, Jagoda, Majer, Ryżyński (red.) i in., 2024)

Na podstawie Karty lokalizacji podziemnego magazynu ciepła przeprowadza się ocenę lokalizacji dla każdej technologii oraz dla każdego syntetycznego profilu litologicznego wykorzystując Karty oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnego magazynu ciepła w zależności od rodzaju magazynu.

Ocenę prowadzoną dla powierzchni należy przygotowywać w oparciu o procentowe pokrycie terenu danym wydzieleniem/klasą, natomiast ocenę wykonaną w oparciu o syntetyczne profile litologiczne należy sporządzić w oparciu o procentowy udział gruntów i skał w profilu.

Ocenę potencjalnych lokalizacji należy przeprowadzać w oparciu o kryteria podane w rozdziale 7.

Wartość punktowa przyznana poszczególnym kryteriom została umieszczona w polu wypełnionym kolorem w zależności od ustalonych warunków (niekorzystnych, średnio korzystnych, korzystnych).

Wyniki oceny wykorzystuje się do sporządzenia rankingu podziemnych magazynów ciepła.

Wzór Karty oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnego magazynu ciepła w zależności od rodzaju magazynu przedstawiono poniżej.

**KARTA OCENY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA ZA POMOCĄ SYSTEMÓW BTES i EF(TG)\***  
**6\_PL\_UTES\_339\_1c - WARIANT\_I\_BTES**

		<b>KRYTERIA GRUPY I</b>		<b>NOTY PUNKTOWE DO OCENY</b>		
		<b>Rozdział</b>	<b>Nazwa kryterium</b>	<b>niekorzystna</b>	<b>średnio korzystna</b>	<b>korzystna</b>
<b>KRYTERIA POWIERZCHNIOWE</b>	7.1	spadki powierzchni terenu		<50 % spadków małych	50-75 % spadków małych	>75 % spadków małych
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
	7.2	forma geomorfologiczna		<50 % grupy geomorfologicznej A	50-75 % grupy geomorfologicznej A	>75 % grupy geomorfologicznej A
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
	7.3	niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie		<50 % nie występują	50-75 % nie występują	>75 % nie występują
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
	7.5	sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych		wysokie (>2 m)	średnie (1-2 m)	niskie (<1 m)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
		<b>KRYTERIA GRUPY II</b>		<b>NOTY PUNKTOWE DO OCENY</b>		
		<b>Rozdział</b>	<b>Nazwa kryterium</b>	<b>niekorzystna</b>	<b>średnio korzystna</b>	<b>korzystna</b>
<b>KRYTERIA DO SYNTETYCZNEGO PROFILU LITOLOGICZNEGO</b>	7.6	jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego		4 i więcej profili	3 profile	1 lub 2 profile
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
	7.7	zwiercalność gruntów i skał		3 i więcej zmian	1-2 zmiany	brak zmian
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>6</b>	<b>12</b>
	7.9	procentowy udział utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych		<50%	50-75%	>75%
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
	7.10	przewodność termiczna gruntów i skał		<1,0 lub >3,0 W/(m*K)	1,0-1,5 lub 2,5-3,0 W/(m*K)	1,5-2,5 W/(m*K)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>8</b>	<b>16</b>
	7.11	objętościowa pojemność cieplna gruntów i skał		<2,0 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	2,0-2,3 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	>2,3 MJ/(m <sup>3</sup> *K)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>

KRYTERIUM OPISOWE	7.15	Stopień rozpoznania terenu		Suma punktów do oceny przydatności
	niekorzystna	średnio korzystna	korzystna	
	dane archiwalne	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe i szczegółowe	65,0

KLASY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA					
	<i>0-21 punktów</i>	<i>21-40 punktów</i>	<i>41-60 punktów</i>	<i>61-80 punktów</i>	<i>81-100 punktów</i>
OCENA DO RANKINGU	lokalizacja o bardzo niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów BTES	lokalizacja o niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów BTES	lokalizacja o średnim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów BTES	lokalizacja o wysokim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów BTES	lokalizacja o bardzo wysokim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów BTES

\* - numery rozdziałów według opracowania pt. „Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)” (Żeruń, Jagoda, Majer, Ryżyński (red.) i in., 2024)

**KARTA OCENY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA ZA POMOCĄ SYSTEMÓW BTES i EF(TG)\***  
**6\_PL\_UTES\_339\_1c - WARIANT I\_EF**

		<b>KRYTERIA GRUPY I</b>		<b>NOTY PUNKTOWE DO OCENY</b>		
		<b>Rozdział</b>	<b>Nazwa kryterium</b>	<b>niekorzystna</b>	<b>średnio korzystna</b>	<b>korzystna</b>
<b>KRYTERIA POWIERZCHNIOWE</b>	7.1	spadki powierzchni terenu		<50 % spadków małych	50-75 % spadków małych	>75 % spadków małych
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
	7.2	forma geomorfologiczna		<50 % grupy geomorfologicznej A	50-75 % grupy geomorfologicznej A	>75 % grupy geomorfologicznej A
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
	7.3	niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie		<50 % nie występują	50-75 % nie występują	>75 % nie występują
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
	7.5	sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych		wysokie (>2 m)	średnie (1-2 m)	niskie (<1 m)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
		<b>KRYTERIA GRUPY II</b>		<b>NOTY PUNKTOWE DO OCENY</b>		
		<b>Rozdział</b>	<b>Nazwa kryterium</b>	<b>niekorzystna</b>	<b>średnio korzystna</b>	<b>korzystna</b>
<b>KRYTERIA DO SYNTETYCZNEGO PROFILU LITOLOGICZNEGO</b>	7.6	jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego		4 i więcej profili	3 profile	1 lub 2 profile
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
	7.7	zwiercalność gruntów i skał		3 i więcej zmian	1-2 zmiany	brak zmian
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>6</b>	<b>12</b>
	7.9	procentowy udział utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych		<50%	50-75%	>75%
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>
	7.10	przewodność termiczna gruntów i skał		<1,0 lub >3,0 W/(m*K)	1,0-1,5 lub 2,5-3,0 W/(m*K)	1,5-2,5 W/(m*K)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>8</b>	<b>16</b>
	7.11	objętościowa pojemność cieplna gruntów i skał		<2,0 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	2,0-2,3 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	>2,3 MJ/(m <sup>3</sup> *K)
		<i>Nota punktowa</i>		<b>0</b>	<b>8</b>	<b>16</b>

<b>KRYTERIUM OPISOWE</b>	7.15	Stopień rozpoznania terenu		<b>Suma punktów do oceny przydatności</b>
	<b>niekorzystna</b>	<b>średnio korzystna</b>	<b>korzystna</b>	
	dane archiwalne	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe i szczegółowe	<b>76,0</b>

<b>KLASY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA</b>						
<b>OCENA PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI (na potrzeby sporządzenia rankingu lokalizacji)</b>	<b>punktowa</b>	<b>0-21 punktów</b>	<b>21-40 punktów</b>	<b>41-60 punktów</b>	<b>61-80 punktów</b>	<b>81-100 punktów</b>
	<b>jakościowa</b>	lokalizacja o bardzo niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów EF(TG)	lokalizacja o niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów EF(TG)	lokalizacja o średnim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów EF(TG)	lokalizacja o wysokim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów EF(TG)	lokalizacja o bardzo wysokim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów EF(TG)

\* - numery rozdziałów według opracowania pt. „Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)” (Żeruć, Jagoda, Majer, Rzyżyński (red.) i in., 2024)

**KARTA OCENY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA ZA POMOCĄ SYSTEMÓW PTES i TTES\***  
**6\_PL\_UTES\_339\_1c - WARIANT\_I\_PTES/TTES**

		KRYTERIA GRUPY I		NOTY PUNKTOWE DO OCENY		
		Rozdział	Nazwa kryterium	niekorzystna	średnio korzystna	korzystna
<b>KRYTERIA POWIERZCHNIOWE</b>	7.1	spadki powierzchni terenu	<50 % spadków małych	50-75 % spadków małych	>75 % spadków małych	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	
	7.2	forma geomorfologiczna	<50 % grupy geomorfologicznej A	50-75 % grupy geomorfologicznej A	>75 % grupy geomorfologicznej A	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	
	7.3	niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie	<50 % nie występują	50-75 % nie występują	>75 % nie występują	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	
	7.4	dostępność złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła	> 60 km	> 20 - ≤ 60 km	0- ≤ 20 km	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	
	7.5	sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych	wysokie (>2 m)	średnie (1-2 m)	niskie (<1 m)	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	
		KRYTERIA GRUPY II		NOTY PUNKTOWE DO OCENY		
		Rozdział	Nazwa kryterium	niekorzystna	średnio korzystna	korzystna
<b>KRYTERIA DO SYNTETYCZNEGO PROFILU LITOLOGICZNEGO</b>	7.6	jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego	4 i więcej profili	3 profile	1 lub 2 profile	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	
	7.8	urabialność gruntów i skał	<50 % grupy urabialności A	50-75 % grupy urabialności A	>75 % grupy urabialności A	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	
	7.9	procentowy udział utworów gdzie nie występuje ryzyko wysokiej prędkości przepływu wód podziemnych	<50%	50-75%	>75%	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	
	7.10	przewodność termiczna gruntów i skał	>1,8 W/(m*K)	1,3-1,8 W/(m*K)	<1,3 W/(m*K)	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	
	7.11	objętościowa pojemność cieplna gruntów i skał	<1,8 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	1,8-2,0 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	>2,0 MJ/(m <sup>3</sup> *K)	
		<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	

KRYTERIA GRUPY II		NOTY PUNKTOWE DO OCENY		
Rozdział	Nazwa kryterium	niekorzystna	średnio korzystna	korzystna
7.12	przydatność podłoża do budowy podziemnych magazynów ciepła	<50 % grupy przydatności A	50-75 % grupy przydatności A	>75 % grupy przydatności A
	<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>8</b>
7.13	przydatność gruntów i skał z wykopów do wbudowania w nasyp	<50 % grupy przydatności A	50-75 % grupy przydatności A	>75 % grupy przydatności A
	<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
7.14	głębokość do pierwszego nawierconego zwierciadła wód podziemnych			poniżej poziomu posadowienia magazynu
	<i>Nota punktowa</i>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>12</b>

KRYTERIUM OPISOWE	7.15	Stopień rozpoznania terenu			Suma punktów do oceny przydatności
	niekorzystna	średnio korzystna	korzystna		
	dane archiwalne	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe	dane archiwalne, wykonane badania podstawowe i szczegółowe		<b>41,0</b>

#### KLASY PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI DO BUDOWY PODZIEMNEGO MAGAZYNU CIEPŁA

OCENA PRZYDATNOŚCI LOKALIZACJI (na potrzeby sporządzenia rankingu lokalizacji)	punktowa	<b>0-21 punktów</b>	<b>21-40 punktów</b>	<b>41-60 punktów</b>	<b>61-80 punktów</b>	<b>81-100 punktów</b>
	jakościowa		lokalizacja o bardzo niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów PTES i TTES	lokalizacja o niskim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów PTES i TTES	lokalizacja o średnim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów PTES i TTES	lokalizacja o wysokim potencjale magazynowania ciepła w górotworze za pomocą systemów PTES i TTES

\* - numery rozdziałów według opracowania pt. „Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)” (Żeruń, Jagoda, Majer, Rzyżyński (red.) i in., 2024)

### 8.3.4. Ranking lokalizacji

Ranking lokalizacji sporządza się w celu porównywania różnych miejsc pod kątem ich przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła. Ranking lokalizacji podziemnych magazynów ciepła można przeprowadzić na dwa sposoby:

- w sposób uproszczony na podstawie przyjętych założeń,
- w sposób zaawansowany na podstawie algorytmu obliczeniowego.

Poniżej opisano sposoby sporządzania rankingu lokalizacji podziemnych magazynów ciepła.

#### 8.3.4.1. Uproszczony ranking lokalizacji na podstawie przyjętych założeń

Ranking lokalizacji na podstawie przyjętych założeń obejmuje następujące czynności:

- przygotowanie tabeli z danymi - należy utworzyć zestawienie tabelaryczne, w którym uwzględnione zostaną następujące informacje dla każdej lokalizacji:
  - Numer lokalizacji,
  - Nazwa lokalizacji,
  - Rodzaj systemu magazynowania,
  - Maksymalna wartość punktowa oceny przydatności lokalizacji,
  - Minimalna wartość punktowa oceny przydatności lokalizacji,
  - Średnia wartość punktowa oceny przydatności lokalizacji,
  - Liczba klas przydatności lokalizacji wynikająca z oceny punktowej:
    - Bardzo niskie - 0–20, klasa 1,
    - Niskie - 21–40, klasa 2,
    - Średnie - 41–60, klasa 3,
    - Wysokie - 61–80, klasa 4,
    - Bardzo wysokie - 81–100 klasa 5.
  - Różnica między maksymalną minimalną wartością punktowa oceny przydatności lokalizacji,
  - Miejsce w rankingu lokalizacji;
- sortowanie lokalizacji - lokalizacje należy uporządkować według następujących kryteriów:
  - Średnia wartość punktowa obliczona na podstawie ocen wszystkich syntetycznych profili przypisanych lokalizacji w danej technologii,
  - Liczba klas przydatności, wynikająca z oceny punktowej;
- analiza różnic w klasach przydatności - należy zweryfikować, czy w grupach lokalizacji o tej samej klasie przydatności występują duże różnice między maksymalną a minimalną wartością punktową,
- dostosowanie pozycji w rankingu - w przypadku lokalizacji, której wartość minimalna i maksymalna różnią się klasą przydatności, należy wprowadzić korekty:
  - Zmiana pozycji lokalizacji na niższą w rankingu:

Jeśli maksymalna wartość punktowa lokalizacji odpowiada klasie pozostałych lokalizacji w analizowanym przedziale, lokalizację należy umieścić za innymi w tej grupie, kierując się wielkością różnicy między maksymalną a minimalną wartością punktową. Priorytet pozycjonowania od najwyższego miejsca w tabeli:

    - Różnica w ocenie przydatności o jedną klasę.
    - Różnica w ocenie przydatności o dwie klasy.
    - Różnica w ocenie przydatności o trzy klasy, itd.

- Zmiana pozycji lokalizacji na wyższą w obrębie tej samej klasy przydatności:
- Jeśli maksymalna wartość punktowa lokalizacji jest wyższa od wartości punktowych pozostałych lokalizacji w tej samej klasie przydatności, należy ją umieścić przed innymi w tej grupie, zgodnie z wielkością różnicy między maksymalną a minimalną wartością punktową. Priorytet przesuwania (od największej do najmniejszej stabilności):
  - Różnica o jedną klasę.
  - Różnica o dwie klasy.
  - Różnica o trzy klasy, itd.

Ranking lokalizacji przygotowany zgodnie z powyższymi krokami może być wykorzystany jako narzędzie do wstępnej oceny przydatności lokalizacji magazynów ciepła, uwzględniając zarówno średnie oceny, jak i stabilność wyników punktowych.

Sposób przygotowania rankingu w sposób uproszczony przedstawiono w tabelach (Tabela 53, Tabela 54, Tabela 55), gdzie:

- Nr lokalizacji - unikalny identyfikator przypisany każdej lokalizacji,
- Lokalizacja - nazwa lub oznaczenie geograficzne danej lokalizacji,
- System - technologia magazynowania ciepła (BTES, PTES/TTES, EF(TG)),
- Maks. ocena - najwyższy wynik punktowy przyznany pojedynczemu syntetycznemu profilowi lokalizacji w danej technologii,
- Min. ocena - najniższy wynik punktowy przyznany pojedynczemu syntetycznemu profilowi lokalizacji w danej technologii,
- Śr. ocena - średni wynik punktowy obliczony na podstawie ocen wszystkich syntetycznych profili przypisanych lokalizacji w danej technologii,
- Zróżnicowanie klas - różnych klas przydatności przypisanych jednej lokalizacji w danej technologii, wyznaczona na podstawie ocen wszystkich syntetycznych profili,
- Zróżnicowanie oceny - różnica pomiędzy najwyższą a najniższą wartością punktową przyznaną lokalizacji w danej technologii,
- Pozycja - pozycja lokalizacji w rankingu w danej technologii.

**Tabela 53 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób uproszczony (technologia BTES)**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	Maks. ocena	Min. ocena	Śr. ocena	Różnica klas	Różnica ocen	Pozycja
14		BTES	79	79	79	0	0	1
5		BTES	75	75	75	0	0	2
12		BTES	68	68	68	0	0	3
24		BTES	65	65	65	0	0	4
13		BTES	66	60	65	1	6	5
20		BTES	72	51	63	1	21	6
9		BTES	72	52	61	1	20	7
15		BTES	62	47	52	1	15	8
17		BTES	59	59	59	0	0	9
16		BTES	58	58	58	0	0	10
19		BTES	52	52	52	0	0	11
11		BTES	48	41	46	0	7	12
7		BTES	40	32	35	0	8	13

**Tabela 54 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób uproszczony (technologia EF(TG))**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	Maks. ocena	Min. ocena	Śr. ocena	Różnica klas	Różnica ocen	Pozycja
14		EF(TG)	85	71	78	1	14	1
4		EF(TG)	73	73	73	0	0	2
20		EF(TG)	71	64	69	0	7	3
2		EF(TG)	66	66	66	0	0	4
23		EF(TG)	65	65	65	0	0	5
13		EF(TG)	78	56	69	1	22	6
5		EF(TG)	66	58	62	1	8	7
15		EF(TG)	62	48	53	1	14	8
19		EF(TG)	57	55	56	0	2	9
18		EF(TG)	57	50	54	0	7	10
22		EF(TG)	60	44	52	0	16	11
1		EF(TG)	47	46	47	0	1	12
25		EF(TG)	43	43	43	0	0	13

**Tabela 55 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób uproszczony (technologia PTES/TTES)**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	Maks. ocena	Min. ocena	Śr. ocena	Różnica klas	Różnica ocen	Pozycja
12		PTES/TTES	87	57	67	2	30	1
5		PTES/TTES	74	62	68	0	12	2
15		PTES/TTES	70	61	66	0	9	3
18		PTES/TTES	68	50	59	1	18	4
6		PTES/TTES	65	41	53	1	24	5
14		PTES/TTES	60	57	59	0	3	6
8		PTES/TTES	51	49	50	0	2	7
17		PTES/TTES	49	44	47	0	5	8
11		PTES/TTES	52	32	45	1	20	9
16		PTES/TTES	43	40	42	1	3	10
7		PTES/TTES	44	20	31	2	24	11
22		PTES/TTES	39	39	39	0	0	12
21		PTES/TTES	36	21	29	0	15	13

Po wykonaniu rankingu można zaobserwować, że ta sama lokalizacja w zależności od technologii magazynowania ciepła może zostać sklasyfikowana na innym miejscu. Informacja ta może być przydatna do wyboru optymalnej technologii magazynowania ciepła.

#### 8.3.4.2. Ranking lokalizacji z wykorzystaniem algorytmu obliczeniowego

Ranking lokalizacji z wykorzystaniem algorytmu obliczeniowego służy do budowy systemu rankingowego, który uwzględnia różnorodne aspekty danych, takie jak wartości średnie, minimalne, maksymalne, różnice między nimi oraz liczbę syntetycznych profili litologicznych w obrębie analizowanej lokalizacji. Punktem centralnym metody jest opracowanie wartości rankingowych lokalizacji umożliwiających analizę wieloaspektowych danych i przypisanie poszczególnym lokalizacjom pozycji w rankingu. Przyjęte podejście pozwala na porównanie lokalizacji przy zastosowaniu zunifikowanej formuły matematycznej. Kluczowe etapy tego procesu oraz ich uzasadnienie przedstawiono poniżej.

W pierwszym kroku dane zostały przetworzone poprzez klasyfikację wartości minimalnych i maksymalnych do pięciu klas jakościowych odpowiadających klasom przydatności lokalizacji do budowy podziemnego magazynu ciepła. Podział ten oparto na równych przedziałach w skali 0–100 punktów:

- Bardzo niskie - 0–20, klasa 1,
- Niskie - 21–40, klasa 2,
- Średnie - 41–60, klasa 3,
- Wysokie - 61–80, klasa 4,
- Bardzo wysokie - 81–100 klasa 5.

Przypisanie klas dla maksymalnych i minimalnych wartości oceny lokalizacji w danej technologii magazynowania umożliwiło jakościowe porównanie danych w określonym zakresie. Intuicyjność tego podejścia zapewnia sprawną interpretację wyników. Na potrzeby obliczeń wartości rankingowych klasom przypisano wartości liczbowe według powyższego schematu. Różnica pomiędzy przypisanymi wartościami klas maksymalnych i minimalnych występujących w danej lokalizacji została włączona do analizy jako wskaźnik spójności danych. Mniejsza różnica klas świadczy o większej jednorodności analizowanych syntetycznych profili litologicznych i jest premiowana wyższą punktacją.

Drugim krokiem było zastosowanie wzoru matematycznego do obliczenia punktacji rankingowej. W trzech pierwszych członach równania zastosowano normalizację (dzielenie przez 20) umożliwiającą wzajemne porównanie i ustalenie hierarchii wpływu czynników. Wyrażenie to uwzględnia kilka kluczowych elementów, które są opisane poniżej:

$$Z = \frac{\bar{x} \times 2.0}{20} + \frac{(O_{max} + O_{min}) \times 1.0}{20} - \frac{(O_{max} - O_{min}) \times 0.75}{20} - (K_{max} - K_{min}) \times 0.5 - P \times 0.25$$

gdzie:

**Z** – wartość rankingowa,

**$\bar{x}$**  - średnia wartość ocen przydatności wybranej lokalizacji do budowy podziemnego magazynu ciepła w danej technologii (średnia wyznaczona na podstawie wszystkich ocen profili syntetycznych w obrębie danej technologii),

**$O_{max}$**  - maksymalna wartość oceny lokalizacji w danej technologii magazynowania,

**$O_{min}$**  - minimalna wartość oceny lokalizacji w danej technologii magazynowania,

**$K_{max}$**  - klasa przypisana maksymalnej wartości oceny,

**$K_{min}$**  - klasa przypisana minimalnej wartości oceny,

**P** - liczba syntetycznych profili litologicznych.

Poszczególne elementy wzoru oraz ich wagi mają określone znaczenie w końcowej ocenie lokalizacji. Każdy element równania ma przypisaną wagę zgodną z opracowaną ekspercko hierarchią wpływu czynników.

Średnia wartość sumy punktów do oceny przydatności  $\bar{x}$  jest premiowana przez użycie współczynnika 2,0, co podkreśla jej znaczenie jako głównego wskaźnika ogólnej przydatności lokalizacji do budowy magazynu ciepła. Wyższa średnia świadczy o lepszych warunkach do budowy magazynu ciepła w danej lokalizacji w ujęciu ogólnym, dlatego została odpowiednio wyróżniona i traktowana jest jako pierwsza w hierarchii.

Uzasadnienie dla rozpatrywania sumy wartości  $O_{max}$  i  $O_{min}$  we wzorze oraz przypisanej wagi 1,0 opiera się na uwzględnieniu zarówno najlepszego, jak i najgorszego możliwego scenariusza w analizowanej lokalizacji. Wartości punktowe minimalne i maksymalne w tym kontekście mają na celu oddanie pełnego zakresu potencjałów danej lokalizacji, uwzględniając zarówno najbardziej korzystne, jak i najbardziej niekorzystne warunki, które mogą wystąpić na danym obszarze. Im wyższa suma tych dwóch wartości, tym wyższa wartość rankingowa – lokalizacja charakteryzuje się szerszym zakresem pozytywnych cech (wysoka wartość maksymalna) oraz względnie niską wartością potencjalnych ograniczeń (stosunkowo wysoka wartość minimalna).

Jednocześnie różnica między wartościami  $O_{max}$  i  $O_{min}$  świadczy o rozpiętości warunków do budowy magazynu ciepła w danej lokalizacji i działa na niekorzyść finalnej wartości rankingowej. Różnica pozwala na analizę rozpiętości oceny w obrębie lokalizacji, która może wystąpić w obrębie jednej

klasy. Ze względu na zastosowane przedziały liczbowe klas rozpiętość może wynosić nawet 20 punktów (1/5 całkowitej punktacji). Wpływ różnicy został uwzględniony z wagą 0,75.

Różnica między  $K_{max}$  i  $K_{min}$  została uwzględniona w celu oceny spójności danych. Większa różnica pomiędzy klasami świadczy o większym zróżnicowaniu i niepewności warunków występujących na obszarze analizowanej lokalizacji przez co obniża wartość rankingową lokalizacji. Przypisano jej współczynnik wagi 0.5.

Ostatnią pozycję w hierarchii wpływu czynników ma liczba syntetycznych profili litologicznych  $P$ . Jest to czynnik zmniejszający końcową punktację, ponieważ większa liczba profili świadczy o większym zróżnicowaniu budowy geologicznej obszaru. Współczynnikowi przypisano wagę 0,25.

Przyjęta formuła cechuje się kompleksowym podejściem łącząc różne aspekty danych w jednej metryce. Eksperycki dobór wag w oparciu o hierarchię wpływu czynników oraz elastyczność formuły umożliwia jej łatwe zastosowanie na kolejnych zestawach danych. Jednocześnie możliwa jest łatwa korekta formuły (w razie potrzeb) poprzez modyfikację wag przypisanych poszczególnym elementom. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia zestandaryzowany i uniwersalny sposób oceny danych. Dzięki połączeniu różnych elementów w jedną spójną formułę możliwe jest nie tylko porównanie rekordów w sposób obiektywny, ale także identyfikacja najlepszych technologii w ujęciu wieloaspektowym. Przyjęte podejście łączy intuicyjność, kompleksowość i elastyczność, co czyni je skutecznym narzędziem analitycznym.

Sposób przygotowania rankingu w sposób zaawansowany przedstawiono w tabelach (Tabela 56,

Tabela 57,

Tabela 58).

**Tabela 56 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób zaawansowany (technologia BTES)**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	$O_{max}$	$O_{min}$	$\bar{x}$	$K_{max}$	$K_{min}$	$P$	$Z$	Pozycja
14		BTES	79	79	79,00	4	4	2	15,30	1
5		BTES	75	75	75,00	4	4	2	14,50	2
12		BTES	68	68	68,00	4	4	3	12,85	3
10		BTES	65	65	65,00	4	4	1	12,75	4
25		BTES	59	59	59,00	3	3	1	11,55	5
23		BTES	58	58	58,00	3	3	1	11,35	6
16		BTES	58	58	58,00	3	3	2	11,10	7
13		BTES	66	60	64,50	4	3	4	11,03	8
18		BTES	60	52	56,00	3	3	2	10,40	9
19		BTES	52	52	52,00	3	3	2	9,90	10
1		BTES	49	49	49,00	3	3	3	9,05	11
11		BTES	48	41	45,67	3	3	3	8,00	12
7		BTES	40	32	34,67	2	2	3	6,02	13

**Tabela 57 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób zaawansowany (technologia EF(TG))**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	$O_{max}$	$O_{min}$	$\bar{x}$	$K_{max}$	$K_{min}$	$P$	$Z$	Pozycja
4		EF(TG)	73	73	73,00	4	4	2	14,10	1
6		EF(TG)	76	69	72,50	4	4	2	13,74	2
2		EF(TG)	66	66	66,00	4	4	1	12,95	3
17		EF(TG)	70	64	67,00	4	4	2	12,68	4
8		EF(TG)	69	62	65,50	4	4	2	12,34	5
21		EF(TG)	67	60	63,50	4	3	2	11,44	6
24		EF(TG)	57	57	57,00	3	3	1	11,15	7
19		EF(TG)	57	55	56,00	3	3	2	10,63	8
18		EF(TG)	57	50	53,50	3	3	2	9,94	9
22		EF(TG)	60	44	52,00	3	3	2	9,30	10
15		EF(TG)	62	48	52,67	4	3	3	8,99	11
1		EF(TG)	47	46	46,67	3	3	3	8,53	12
7		EF(TG)	46	45	45,67	3	3	3	8,33	13

**Tabela 58 Sposób przygotowania przykładowego rankingu w sposób zaawansowany (technologia PTES/TTES)**

Nr lokalizacji	Lokalizacja	System	$O_{max}$	$O_{min}$	$\bar{x}$	$K_{max}$	$K_{min}$	$P$	$Z$	Pozycja
10		PTES/TTES	68	68	68,00	4	4	1	13,35	1
2		PTES/TTES	63	63	63,00	4	4	1	12,35	2
19		PTES/TTES	60	60	60,00	3	3	2	11,50	3
12		PTES/TTES	87	57	67,33	5	3	3	11,06	4
4		PTES/TTES	61	55	58,00	4	3	2	10,38	5
13		PTES/TTES	88	46	66,00	5	3	4	9,73	6
25		PTES/TTES	45	45	45,00	3	3	1	8,75	7
17		PTES/TTES	49	44	46,50	3	3	2	8,61	8
24		PTES/TTES	40	40	40,00	2	2	1	7,75	9
1		PTES/TTES	55	38	45,00	3	2	3	7,26	10
3		PTES/TTES	38	38	38,00	2	2	2	7,10	11
9		PTES/TTES	45	33	38,67	3	2	3	6,07	12
7		PTES/TTES	44	20	31,00	3	1	3	3,65	13

#### 8.4. Szczegółowa charakterystyka lokalizacji

**Etap IV – Szczegółowa charakterystyka lokalizacji** polega na przeprowadzeniu szczegółowych analiz i wykonaniu wstępnych (Etap IVa) i/lub szczegółowych (Etap IVb) badań lokalizacyjnych (terenowych i laboratoryjnych) przy uwzględnieniu wyników prac w etapach wcześniejszych, zwłaszcza na etapie wstępnej charakterystyki lokalizacji.

Na tym etapie prace są realizowane w obrębie wybranej lokalizacji podziemnego magazynu ciepła w celu m.in. ustalenia technologii magazynowania energii cieplnej i opracowania projektu budowlanego.

Badania lokalizacyjne (terenowe i laboratoryjne) wykonuje się zazwyczaj w dwóch etapach z uwagi na brak wystarczających danych archiwalnych do odpowiedniego zaprojektowania badań na potrzeby prac projektowych i budowy podziemnego magazynu ciepła.

Zakres prac na etapie szczegółowej charakterystyki lokalizacji ustala się indywidualnie w zależności od cech lokalizacji i potrzeb procesu inwestycyjnego.

#### 8.5. Badania lokalizacyjne

Na każdym etapie oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła wykonuje się badania lokalizacyjne (ang. site investigation), które obejmują (Rysunek 87):

- zebranie i przegląd danych archiwalnych (ang. desk study),
- wizję terenową (ang. site inspection),
- badania wstępne (ang. preliminary site investigation)),
- badania szczegółowe (ang. detailed site investigation).

Na etapie planowania inwestycji można przeprowadzić ocenę na podstawie danych archiwalnych. Na kolejnych etapach procesu inwestycyjnego, wraz ze wzrostem liczby informacji o lokalizacji oraz o ośrodku gruntowo-skalnym, możemy wykonać badania geofizyczne i/lub otwory testowe/pilotażowe. Wtedy jednorodność ośrodka gruntowo-skalnego można oceniać do głębokości optymalnej tj. najbardziej korzystnej z punktu widzenia sprawności energetycznej i możliwości wyboru optymalnych rozwiązań technicznych. Poniżej opisano rodzaje badań lokalizacyjnych.

### 8.5.1. Zebranie i przegląd danych archiwalnych

Na potrzeby procesu oceny przydatności i wyboru lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła gromadzi się i przegląda dostępne dane archiwalne. Zakres danych zależy od etapu prac oraz zakresu badań lokalizacyjnych terenowych i laboratoryjnych i obejmuje:

- materiały archiwalne w szczególności dokumentacje geologiczne zgromadzone w archiwach,
- dane literaturowe w szczególności artykuły, monografie,
- dane zgromadzone w rejestrach publicznych w szczególności w bazach danych,
- wyniki prac i badań terenowych (dane z pomiarów teledetekcyjnych i fotogrametrycznych).

Poniżej zestawiono wybrane dane, które można wykorzystać do oceny lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła:

- dane pochodzące z dokumentacji archiwalnych znajdujących się w centralnym archiwum geologicznym oraz innych państwowych lub prywatnych archiwach,
- informacje zawartych w bazach danych, w tym m.in.:
  - Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich (BDGI),
  - Bazach Danych Mapy geologiczno - inżynierskiej Polski (BDMgiP),
  - Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG),
  - Centralnej Bazy Danych Hydrogeologicznych (CBDH) tzw. Bank Hydro,
  - bazie danych „Pobory”,
  - rejestrze Obszarów Górniczych oraz systemie Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych Polski MIDAS,
  - bazie danych Systemu Osłony Przeciwosuwiskowej SOPO,
  - bazie danych GIS Głównych Zbiorników Wód Podziemnych,
  - bazie PODTOPIENIA i mapa obszarów zagrożonych podtopieniami,
  - dane i metadane udostępniane przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska w ramach projektu CORINE Land Cover 2018,
  - Centralny Rejestr Form Ochrony Przyrody prowadzony przez Generalną Dyрекcję Ochrony Środowiska,
  - innych,
- mapy o tematyce geologicznej, hydrogeologicznej, geologiczno-inżynierskiej, środowiskowej i innej, w tym m.in.:
  - Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami,
  - Mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:50 000 (MgiP50k),
  - Mapa Geośrodowiskowa Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami (Plansza A i B),
  - Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000,
  - Mapa Hydrogeologiczna Polski – Pierwszy Poziom Wodonośny – Występowanie i Hydrodynamika w skali 1:50 000,
  - Mapa Hydrogeologiczna Polski – Pierwszy Poziom Wodonośny – Wrażliwość na Zanieczyszczenie w skali 1:50 000,
  - Mapa obszarów o wysokim ryzyku podtopień w skali 1:50 000;
  - Rastrowa Mapa Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:50 000, opracowana przez Zakład Hydrografii i Morfologii Koryt Rzecznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie, udostępniona przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej,
  - Mapa hazardu sejsmicznego obszaru Polski opracowana na podstawie pracy Schenk i in. (2001),

- Mapa Glebowo-Rolnicza 1:50 000 opracowana przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (IUNG-PIB), 2005,
- innych,
- dane i mapy zgromadzone w rejestrach publicznych, w tym m.in.:
  - mapy topograficzne w skalach 1:10 000 i 1:100 000,
  - zdjęcia satelitarne i ortofotomapy,
  - Numerycznego Modelu Terenu (NMT),
- inne opracowania, w tym m.in.:
  - monitoring geodynamiczny prowadzony przez PIG-PIB,
  - bilans zasobów złóż kopalin,
  - archiwalnych danych o historycznych zjawiskach sejsmicznych opracowane w IGF PAN i przedstawione w pracach Pagaczewski (1972), Guterch (2009) oraz Guterch i Lewandowska-Marciniak (2002),
  - Biuletyny Sejsmologiczne IGF PAN;
  - Raporty MZSOP - Monitoringu Zagrożenia Sejsmicznego Obszaru Polski, 2012,
  - Geografia regionalna Polski, J. Kondracki, PWN, Warszawa, 2000;
  - Aktualne opracowanie GUS „Ludność. Stan i struktura w przekroju terytorialnym”,
  - Miejscowe Plany Zagospodarowania Przestrzennego,
  - Studia Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Gmin,
  - Programy Ochrony Środowiska Gmin,
  - Plany Gospodarki Odpadami dla Gmin.
- innych np. archiwum Wyższego Urzędu Górniczego.

### **8.5.2. Wizja terenowa**

Wizja terenowa służy weryfikacji pozyskanych informacji archiwalnych, a jej wyniki są wykorzystywane do oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła.

Wizję terenową należy zaplanować po analizie zebranych materiałów archiwalnych. Wizja terenowa pozwala na ustalenie brakujących informacji wymagających uzupełnienia.

Podczas wizji terenowej należy zwrócić uwagę na:

- możliwość dojazdu do lokalizacji,
- ukształtowanie terenu,
- zagospodarowanie terenu,
- występowanie różnego rodzaju obiektów,
- występowanie infrastruktury naziemnej i podziemnej,
- występowanie przejawów działalności antropogenicznej,
- występowanie wód powierzchniowych,
- przejawy wód podziemnych na powierzchni terenu,
- występowanie zagrożeń geologicznych,
- występowanie odsłoneń.

W terenie należy wykonać dokumentację fotograficzną.

Przykład Karty wizji terenowej przedstawiono poniżej.

Karta wizji terenowej służy do sporządzenia Karty lokalizacji podziemnego magazynu ciepła (rozdział 8.3.3).

## KARTA WIZJI TERENOWEJ

**UWAGA:** teren opisujemy pod względem przydatności do budowy magazynu ciepła w formie dużego zbiornika wodnego lub grupy wielu otworów wiertniczych ułożonych promieniście lub fundamentu energetycznego.

**Data wykonania wizji terenowej:** .....

**Lokalizacja (nazwa obiektu z tabeli oraz liczba porządkowa):**

.....

**Możliwość dojazdu do lokalizacji** (w opisie uwzględnić **występowanie dróg dojazdowych** np. brak dróg dojazdowych, występują drogi dojazdowe utwardzone, asfaltowe; **przykładowy opis:** teren zabudowany po stronie wschodniej, po stronie zachodniej występuje las, dostęp do terenu łatwy, występują drogi asfaltowe)

.....

**Ukształtowanie terenu** (w opisie uwzględnić **uksztaltowanie terenu:** wyniesienia, obniżenia, tereny płaskie; jeśli możliwe określić **formę geomorfologiczną** np. dolina małej rzeki, dolina dużej rzeki, taras nadzalewowy, zagłębienie bezodpływowe, wysoczyzna płaska itp.; **przykładowy opis:** teren płaski, lekko pochylony w kierunku północnym, zbocze wysoczyzny):

.....

**Zagospodarowanie terenu** (w opisie uwzględnić **rodzaj zagospodarowania terenu** np. zabudowa zwarta, luźna, brak zabudowy, zabudowa wysoka, średnia, niska (podać liczbę kondygnacji od – do), teren rolny, łąki, uprawy, sady, teren zalesiony, zakrzewiony, nieużytki)

.....

**Występowanie różnego rodzaju obiektów** (w opisie podać **rodzaj występujących obiektów** np. budynki jednorodzinne, budynki handlowe, obiekty wielofunkcyjne, obiekty przemysłowe (np. hale magazynowe, elektrociepłownie, zakłady produkcyjne, magazyny paliw, stacje benzynowe, obiekty sieci transportowej np. linie kolejowe, drogi, lotniska, oczyszczalnie ścieków, obiekty wojskowe, obiekty przyrodnicze, obiekty religijne, obiekty historyczne, obiekty archeologiczne; ślady starych zabudowań np. fundamenty, gruzowiska, ruiny itp.)

.....

**Występowanie infrastruktury możliwej do zaobserwowania** (w opisie podać **rodzaj infrastruktury naziemna/ podziemna;** uwzględnić **występowanie mediów** np. wody, gazu, prądu, telekomunikacji itp.; uwzględnić **występowanie systemów drenażu;** uwzględnić **występowanie infrastruktury przesyłowej** np. ropociągi, gazociągi, linie energetyczne itp.)

.....

**Występowanie przejawów działalności antropogenicznej** (w opisie uwzględnić występowanie różnych form **działalności antropogenicznej w tym górniczej** np. wyrobisk, odkrywek, hałd, zwałowisk, składowisk, **szkód górniczych** np. deformacji terenu, spękań dróg, spękań budynków; inne możliwe do zidentyfikowania)

.....

**Występowanie wód powierzchniowych** (w opisie podać czy na terenie występują ciekły wodne lub zbiorniki wodne (naturalne/ antropogeniczne); wskazać inne zaobserwowane przejawy wód powierzchniowych)

.....

**Przejawy wód podziemnych na powierzchni terenu** (w opisie podać czy na terenie zaobserwowano: źródła, wysięki, podmokłości itp.; wskazać inne zaobserwowane przejawy wód podziemnych)

.....

**Występowanie zagrożeń geologicznych** (w opisie podać czy na terenie zaobserwowano występowanie form, zjawisk mogących świadczyć o występowaniu zagrożeń geologicznych np.: osuwiska, pijany las, strome i/lub odsłonięte zbocza/skarpy, formy erozyjne np. głębokie bruzdy, spływy, zagłębienia terenu itp.)

.....

**Występowanie odsłonięć** (w opisie podać czy na terenie zaobserwowano sztuczne lub naturalne odsłonięcia, odkrywki umożliwiające opis profilu litologicznego),

.....

**Dokumentacja fotograficzna** (wykonać zdjęcie z georeferencją miejsca najbardziej przydatnego do budowy magazynu ciepła; UWAGA: nie wykonujemy zdjęć obiektom i obszarom z zakazem fotografowania; podać liczbę wykonanych zdjęć)

.....

**Autor (imię i nazwisko sporządzającego kartę):**

.....

**Autor (imię i nazwisko sporządzającego wizję terenową):**

### **8.5.3. Badania wstępne**

Badania wstępne można prowadzić w wyznaczonym buforze lub wyznaczonym miejscu przeznaczonym na lokalizację podziemnego magazynu ciepła. Zakres badań wstępnych powinien być dobierany w odniesieniu do cech obszaru przeznaczonego na lokalizację podziemnego magazynu ciepła. Na tym etapie badań lokalizacyjnych, w zależności od ilości danych archiwalnych, zaleca się wykonać:

- kartowanie geologiczno-inżynierskie,
- badania geofizyczne punktowe i/lub ciągi wzdłuż linii pomiarowych metodami dostosowanymi do warunków geologicznych,
- polowe badania właściwości termicznych gruntów i skał,
- w przypadku braku archiwalnych danych z otworów wiertniczych, zaleca się wykonać wiercenia w celu ustalenia profilu litologicznego,
- w przypadku podziemnych magazynów typu EF(TG) oraz PTES/TTES, można wykonać sondowania w celu ustalenia właściwości fizyczno-mechanicznych podłoża przyszłego podziemnego magazynu ciepła.

Wykonane badania są podstawą do wstępnego rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich, w tym geologicznych i hydrogeologicznych obszaru do lokalizacji podziemnych magazynów ciepła.

W pierwszej kolejności należy wykonać kartowanie geologiczno-inżynierskie dla danego obszaru oraz badania geofizyczne.

Kartowanie geologiczno-inżynierskie powinno obejmować rozpoznanie m.in.:

- zagrożeń naturalnych, w tym masowych ruchów ziemi i obszarów zagrożonych ruchami masowymi ziemi, podtopień, obszarów zagrożonych wystąpieniem powodzi,
- niekorzystnych zjawisk geodynamicznych i innych procesów niekorzystnie wpływających na projektowaną inwestycję, np. zagłębienia bezodpływowe okresowo wypełnione wodą, doliny rzeczne,
- lokalizacji przejawów wód podziemnych, w tym źródeł, podmokłości, młak, wysięków oraz cieków powierzchniowych,
- obszarów występowania gruntów słabonośnych,
- obszarów zdegradowanych w wyniku antropopresji.

Celem badań geofizycznych jest wstępne rozpoznanie budowy geologicznej na obszarze lokalizacji. Badania umożliwią ustalenie rozkładu parametrów otrzymywanych z badań geofizycznych w gruntach/skałach występujących w przekroju pionowym wzdłuż linii pomiarowych lub w punkcie.

Otwory wiertnicze i sondowania powinny być wykonywane w odpowiednich technologiach dostosowanych do głębokości rozpoznania oraz rodzaju gruntów i skał występujących w podłożu lokalizacji.

Z pobranych w trakcie wierceń prób gruntów/skał zaleca się wytypować próbki do badań laboratoryjnych i wykonać badania właściwości termicznych i podstawowe badania klasyfikacyjne gruntów i skał.

W przypadku wykonywania wierceń, roboty geologiczne należy prowadzić zgodnie z ustawą z dnia 9 czerwca 2011 Prawo geologiczne i górnicze na podstawie projektu robót geologicznych. W przypadku, gdy rozpatrywana lokalizacja znajduje się na obszarze górniczym, zgodnie z art. 108 ustawy Prawo geologiczne i górnicze, należy dodatkowo opracować plan ruchu zakładu górniczego i przedłożyć do zatwierdzenia właściwemu miejscowo organowi nadzoru górniczego.

Wyniki prac geologicznych należy umieścić w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (EF(TG), PTES/TTES) lub dokumentacji geologicznej innej (BTES) w zależności od rodzaju magazynu ciepła.

#### **8.5.4. Badania szczegółowe**

Badania szczegółowe należy wykonać w wyznaczonym miejscu przeznaczonym na lokalizację podziemnego magazynu ciepła. Zakres badań szczegółowych powinien być dobierany w zależności od potrzeb projektowych i wymagań środowiskowych (jeśli konieczne jest wykonanie oceny oddziaływania na środowisko). Na tym etapie badań lokalizacyjnych, w zależności od ilości danych archiwalnych oraz czy wykonano badania wstępne, zaleca się wykonać:

- kartowanie geologiczno-inżynierskie,
- badania geofizyczne punktowe i/lub ciągi wzdłuż linii pomiarowych metodami dostosowanymi do warunków geologicznych,
- polowe badania właściwości termicznych gruntów i skał,
- wiercenia,
- sondowania w celu ustalenia właściwości fizyczno-mechanicznych podłoża przyszłego podziemnego magazynu ciepła,
- badania hydrogeologiczne,
- badania specjalistyczne.

Wykonane badania są podstawą do szczegółowego rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich w tym geologicznych i hydrogeologicznych miejsca w którym będzie zlokalizowany podziemny magazyn ciepła.

Projektując, wykonując badania oraz przedstawiając wyniki badań lokalizacyjnych należy korzystać z zaleceń zawartych w wynikach badań wstępnych.

## **8.6. Prowadzenie bazy danych w zakresie oceny przydatności lokalizacji do budowy podziemnych magazynów ciepła**

Baza danych w zakresie oceny lokalizacji pod kątem możliwości budowy podziemnych magazynów ciepła w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF(TG)) to zbiór cyfrowych danych umożliwiających charakterystykę, ocenę przydatności i wybór optymalnej lokalizacji magazynu ciepła. Baza danych składa się z:

- danych otworowych, które zawierają profile litologiczne wykorzystane do opracowania syntetycznych profili litologicznych,
- dane parametryczne, które przechowują dane o właściwościach gruntów i skał, w tym o właściwościach termicznych, konieczne do charakterystyki lokalizacji,
- dane przestrzenne, które obejmują warstwy informacyjne GIS o terenie i podłożu lokalizacji.

Prowadzenie bazy danych obejmuje zgromadzenie wszystkich cyfrowych i zdigitalizowanych danych, które są zbierane, wytwarzane na kolejnych etapach oceny lokalizacji oraz podczas badań lokalizacyjnych.

Prawidłowo wykonana i wypełniona baza danych jest podstawą do przeprowadzenia analiz geoprzestrzennych jak i analiz geostatystycznych, które są niezbędne do przeprowadzenia oceny i wyboru lokalizacji.

Baza danych powinna być archiwizowana systematycznie w określonym przedziale czasowym lub po pozyskaniu nowych danych oraz przechowywana na bezpiecznych nośnikach danych np. serwerach z kopią bezpieczeństwa. Pozwoli to na stały dostęp do danych, wykorzystanie danych w kolejnych etapach prac oraz umożliwi ich aktualizowanie, jeśli będą dostępne nowe dane.

Przystosowane do udostępnienia i zwizualizowania dane z bazy powinny być udostępniane w serwisach internetowych w postaci cyfrowej. Dane powinny być pobierane zarówno w formacie rastrowym np. pdf, jak i w formacie wektorowym np. shp. Cyfrowe warstwy informacyjne GIS należy przystosować do udostępniania za pomocą usług WMS, WFS, API, przy czym należy udostępniać te dane i warstwy, które nie są objęte ochroną informacji geologicznej.

Dostęp do bazy danych może być realizowany przez wgląd lub udostępnianie poprzez (Majer, Sokołowska, Majer (red.) i in., 2023):

- Centralne Archiwum Geologiczne (<http://pgi.gov.pl/narodowe-archiwum-geologiczne>),
- Serwis informacyjny o geologii inżynierskiej (<http://inzynierska.pgi.gov.pl>),
- Przeglądarkę mapową GEOLOGIA (<http://geologia.pgi.gov.pl/>),
- Aplikację mobilną GeoLOG (dostępna nieodpłatnie na urządzeniach mobilnych z Google Play i App Store) (<http://geolog.pgi.gov.pl>),
- serwis CBDG GIS oraz aplikację CBDG Menedżer pobierania w zakresie usług WFS, WMS, REST API oraz plików SHP (<http://gis.pgi.gov.pl/>; <http://dm.pgi.gov.pl/>).

## 9. Terminologia

### 9.1. Słownik terminów

Definicje terminów stosowanych w opracowaniu zostały przygotowane przez autorów lub podane na podstawie pozycji literaturowych.

Skrót (pl)	Nazwa (pl)	Synonimy (pl)	Skrót (ang.)	Nazwa (ang.)	Definicja
-	bufor ciepła	-	-	Buffer Storage	Urządzenie magazynujące ciepło krótkoterminowo w postaci gorącej wody lub innego medium, umożliwiające efektywne zarządzanie dystrybucją ciepła w systemach grzewczych i chłodniczych. Wykorzystywane do bilansowania różnic między chwilowymi możliwościami wytwórczymi a zapotrzebowaniem na ciepło.
COWiG	ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja i gazownictwo	-	HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning	Dział inżynierii sanitarnej zajmujący się projektowaniem, budową i eksploatacją systemów ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji oraz gazownictwa.
FE	fundamenty energetyczne	geotechniczne konstrukcje termoaktywne	EF(TG)	Energy Foundations (Thermal Geostuctures)	Elementy konstrukcji obiektu budowlanego znajdujące się w najniższej części budowli, które łączą funkcje przekazywania obciążeń na podłoże z wymiennikami ciepła wykorzystywanymi do akumulacji energii.
GPC	gruntowa pompa ciepła	-	GCHP/ GSHP	Ground Coupled Heat Pumps/ Ground Source Heat Pump	Urządzenie grzewcze pozyskujące energię z gruntu i przekazujące ją do systemu grzewczego lub chłodniczego budynku. Działa na zasadzie wymiany ciepła między podłożem a instalacją grzewczą za pomocą wymienników ciepła umieszczonych w podłożu.
-	kogeneracja (skojarzona gospodarka energetyczna)	-	CHP	Combined Heat And Power	Proces technologiczny polegający na jednoczesnym wytwarzaniu energii elektrycznej i użytkowego ciepła w elektrociepłowniach, co pozwala zwiększyć efektywność energetyczną.
-	konwekcyjny przepływ ciepła	-		Convective Heat Transport	Proces przekazywania ciepła związany z makroskopowym ruchem materii w gazie, cieczy lub plazmie. Zachodzi w wyniku różnic temperatur powodujących zmiany gęstości i ruchu medium.
-	krótkoterminowy magazyn ciepła	-	STTS	Short Term Thermal Storage	Instalacja służąca do akumulacji ciepła w krótkim okresie czasu (od kilku godzin do kilku dni) w celu zbilansowania chwilowych różnic między wytwarzaniem a zapotrzebowaniem na ciepło.
-	magazyn ciepła	magazyn energii cieplnej, magazyn energii termicznej	TES	Thermal Energy Storage	System lub urządzenie służące do gromadzenia ciepła w celu jej późniejszego wykorzystania. Wykorzystuje różnorodne technologie i media akumulacyjne, takie jak woda, grunt, skały, materiały zmienno fazowe czy reakcje chemiczne. Magazyny ciepła wspierają równowagę wahań zapotrzebowania na energię oraz zwiększają efektywność energetyczną systemów ciepłowniczych.
-	magazyn ciepła w warstwie wodonośnej	-	ATES	Aquifer Thermal Energy Storage	Układy studziennych otworów wiertniczych, służące magazynowaniu i eksploatacji ciepła z podziemnej warstwy wodonośnej.
-	magazyn ciepła w kawernach	-	CTES	Cavern Thermal Energy Storage	Podziemny magazyn ciepła wykorzystujący naturalne kawerny do przechowywania energii cieplnej.
-	magazyn ciepła w wyrobiskach górniczych	-	MTES	Mine Thermal Energy Storage	Podziemny magazyn ciepła wykorzystujący wyrobiska górnicze (sztucznie wykonane komory) do przechowywania energii cieplnej.
-	magazyn ciepła w specjalnie wykonanym zbiorniku (naziemnym/podziemnym)	-	TTES	Tank Thermal Energy Storage	Sztuczny zbiornik naziemny lub podziemny, wypełniony wodą, magazynujący ciepło.
-	magazyn ciepła w specjalnie wykonanym zbiorniku przypowierzchniowym	-	PTES	Pit Thermal Energy Storage	Sztuczny zbiornik przypowierzchniowy wypełniony wodą lub mieszaniną wody i żwiru/piasku, magazynujący ciepło.
-	magazyny	-	SHS/SHTES	Sensible Heat	Systemy magazynowania ciepła polegające na

Skrót (pl)	Nazwa (pl)	Synonimy (pl)	Skrót (ang.)	Nazwa (ang.)	Definicja
	wykorzystujące właściwą pojemność cieplną			Storage	podnoszeniu temperatury cieczy lub ciał stałych w celu przechowania energii i jej odzyskania podczas ochładzania.
-	magazyny wykorzystujące entalpię przemiany fazowej	-	LHS/LHTES / PCM	Latent Heat Storage / Latent Heat Thermal Energy Storage/Phase Change Materials	Technologie wykorzystujące materiały zmiennofazowe do akumulacji energii cieplnej poprzez przemiany fazowe (np. topnienie i krzepnięcie).
-	otworowy magazyn ciepła o niskiej temperaturze magazynowania	-	LT-BTES	Low Temperature Borehole Thermal Energy Storage	Magazyn ciepła operujący w zakresie temperatur od 0 °C do 20 °C, wykorzystywany do długoterminowego przechowywania energii cieplnej.
-	otworowy magazyn ciepła	-	BTES	Borehole Thermal Energy Storage	Instalacja wykorzystująca pionowe wymienniki ciepła w gruncie lub skale, pozwalająca na sezonowe akumulowanie i odzyskiwanie ciepła.
OWC	otworowy wymiennik ciepła	-	BHE	Borehole Heat Exchanger	Pionowy wymiennik umożliwiający wymianę ciepła z otaczającą skałą lub gruntem za pomocą przewodzenia cieplnego.
PMC	podziemny magazyn ciepła	-	UTES	Underground Thermal Energy Storage	System przechowywania ciepła w górotworze w tym w strukturach geologicznych (np. warstwie wodonośnej, warstwach gruntów i skał, naturalnych kawernach), w wyrobiskach górniczych lub w specjalnie wykonanych zbiornikach, korzystający z naturalnej izolacji jaką zapewnia grunt/skała. Magazyn wykorzystuje naturalne właściwości termiczne górotworu do przechowywania i odzyskiwania ciepła w celach grzewczych, chłodniczych lub zwiększenia efektywności systemów energetycznych, często z zastosowaniem technologii sezonowego przechowywania ciepła.
-	polietylen o dużej gęstości	-	HDPE	High Density Polyethylene	Polimer termoplastyczny o regularnej strukturze cząsteczek, często stosowany w budowie otworowych wymienników ciepła. Wykazuje znaczną odporność mechaniczną i chemiczną.
-	pompa ciepła	-	HP	Heat Pump	Urządzenie grzewcze, które pozyskuje energię cieplną z otoczenia i przekazuje ją do systemu ogrzewania lub przygotowywania ciepłej wody użytkowej.
	przewodzenie ciepła w stanie nieustalonym	-		Transient Conductive Heat Transport	Proces wymiany ciepła, w którym temperatura w materiale zmienia się w czasie, występujący w dynamicznych warunkach termicznych.
-	sezonowy magazyn ciepła	-	STES	Seasonal Thermal Energy Storage	Instalacja umożliwiająca przechowywanie ciepła wytworzonego w okresie letnim (np. przez kolektory słoneczne) do wykorzystania w sezonie zimowym, bądź „magazynująca chłód” wytworzony w sezonie zimowym do wykorzystania w okresie letnim.
-	sieć ciepłownicza	-	DH	District Heating	System rurociągów i urządzeń służący do przesyłania ciepła z centralnych źródeł ogrzewania do odbiorców końcowych.
	strata ciepła	-		Heat Loss	Utrata energii cieplnej w wyniku procesów przewodzenia, konwekcji lub promieniowania, obniżająca efektywność przechowywania energii.
-	otworowy magazyn ciepła o średniej temperaturze magazynowania	-	MT-BTES	Medium Temperature Borehole Thermal Energy Storage	Magazyn ciepła działający w zakresie temperatur od 20 °C do 50 °C.
-	termochemiczne magazyny ciepła	-	THS/TCES	Thermochemical Heat Storage/ Thermochemical Energy Storage	Systemy magazynowania ciepła wykorzystujące reakcje chemiczne lub procesy sorpcyjne (adsorpcję/absorpcję).
-	test reakcji termicznej	-	TRT	Thermal Reaction Test	Badanie mające na celu określenie efektywnych wartości parametrów termicznych gruntu wokół otworowego wymiennika ciepła.
-	uśredniony koszt ciepła	-	LCOH	Levelized Cost Of Heat	Parametr oceniający koszt energii cieplnej wytwarzanej przez różne technologie w celu ich porównania pod względem efektywności i opłacalności.
-	współczynnik wydajności	-	COP	Coefficient Of Performance	Wskaźnik efektywności energetycznej urządzeń grzewczych, określający stosunek ciepła dostarczonego

Skrót (pl)	Nazwa (pl)	Synonimy (pl)	Skrót (ang.)	Nazwa (ang.)	Definicja
	grzewczej				do zużytej energii elektrycznej.
-	współczynnik wydajności sezonowej	-	SPF	Seasonal Performance Factor	Wartość średnia COP, określana dla całego sezonu grzewczego.
-	otworowy magazyn ciepła o wysokiej temperaturze magazynowania	-	HT-BTES	High Temperature Borehole Thermal Energy Storage	Magazyn ciepła działający w zakresie temperatur powyżej 50 °C.
OZE	Odnawialne Źródła Energii	-	RES	Renewable Energy Sources	Naturalne źródła energii, które są odnawialne w skali czasu życia człowieka, takie jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna, geotermalna i biomasa.
-	Sucha chłodnica	Chłodnia wentylatorowa	-	Dry Cooler	System chłodniczy stosowany głównie do rozpraszania ciepła odpadowego, schładzający wymiennik ciepła poprzez wymuszony przepływ powietrza.
PVT	panele hybrydowe fotowoltaiczno-termiczne	-	PVT	Photovoltaic Thermal panel	Hybrydowe moduły fotowoltaiczne chłodzone cieczą, jednocześnie produkujące zarówno ciepło jak i energię elektryczną w wyniku wystawienia na działanie światła słonecznego.
-	panele fotowoltaiczne	-	PV	Photovoltaic Panel	Moduł fotowoltaiczny produkujący energię elektryczną w wyniku wystawienia na działanie światła słonecznego.
-	klimakonwektor	-	FCU	Fan Coil Unit	Urządzenie klimatyzacyjne służące do ogrzewania lub chłodzenia powietrza w pomieszczeniach, działające w oparciu o wymiennik ciepła i wentylator.
-	Free Cooling	-	-	Free Cooling	Technologia wykorzystująca naturalne źródła chłodu, takie jak zimne powietrze zewnętrzne lub woda, do chłodzenia pomieszczeń lub urządzeń bez użycia agregatów chłodniczych.
	rozproszony pomiar temperatury		DTS	Distributed Temperature Sensing	System pomiarowy umożliwiający ciągły monitoring temperatury wzdłuż włókna światłowodowego, stosowany m.in. w geotermii, magazynach ciepła, ciepłownictwie.

## 9.2. Spis skrótów i symboli

W tabeli poniżej zestawiono skróty i symbole stosowane w opracowaniu.

Skrót/ symbol (pl)	Nazwa (pl)	Nazwa (ang.)	Jednostka
$c, C_w$	ciepło właściwe	Specific Heat Capacity	MJ/(m <sup>3</sup> *K)
D	dyfuzyjność termiczna	Thermal Diffusivity	mm <sup>2</sup> /s
$\rho_d$	gęstość objętościowa	Bulk Density	Mg/m <sup>3</sup>
q	gęstość strumienia ciepła	Heat Flux	W/m <sup>2</sup>
$\rho$	gęstość właściwa	Real Density	Mg/m <sup>3</sup>
$\gamma$	gradient termiczny	Thermal Gradient	°C/km
$K_{max}, K_{min}$	klasa przypisana maksymalnej/minimalnej wartości oceny,		-
P	liczba syntetycznych profili litologicznych.		-
$O_{max}, O_{min}$	maksymalna/minimalna wartość oceny lokalizacji w danej technologii magazynowania,		-
m	miąższość warstwy wodonośnej	Aquifer Thickness	m
HC, $C_v$	objętościowa pojemność cieplna	Specific Heat Capacity	MJ/(m <sup>3</sup> K)
Rho	oporność termiczna	Thermal Resistivity	(K*m)/W
Rb	oporność termiczna wymiennika otworowego	Borehole Thermal Resistance	(K*m)/W
n	porowatość	Porosity	%
$n_o$	porowatość otwarta	Effective Porosity	%
$\lambda, k, TC$	przewodność termiczna	Thermal Conductivity	W/(m*K)
$\bar{x}$	średnia wartość ocen przydatności lokalizacji i do budowy podziemnego magazynu ciepła w danej technologii		-

Skrót/ symbol (pl)	Nazwa (pl)	Nazwa (ang.)	Jednostka
Z	wartość rankingowa		-
k	współczynnik filtracji	Permeability Coefficient	m/d, m/s

## 10. Spis wykorzystanych materiałów

### 10.1. Akty prawne (stan na 30.09.2024 r.)

- Dyrektywa 2000/60/WE ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej,
- Dyrektywa 2004/35/WE w sprawie odpowiedzialności za środowisko w odniesieniu do zapobiegania i zaradzania szkodom wyrządzonym środowisku naturalnemu,
- Dyrektywa 2006/118/WE w sprawie ochrony wód podziemnych przed zanieczyszczeniem i pogorszeniem ich stanu,
- Dyrektywa 2011/92/UE w sprawie oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko,
- Dyrektywa 2020/2184 w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r.,
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniająca dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych oraz uchylająca dyrektywę Rady (UE) 2015/652 (tzw. Dyrektywa RED III) (Dz.U. UE.L, 2023/2413, 31.10.2023, ELI);
- Krajowy Plan w dziedzinie Energii i Klimatu do 2030 r. (aktualizacja KPEiK z 2019 r.).
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U.2024 poz. 266 ze zm.)
- Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie (Dz.U.2020 poz. 2187 ze zm.)
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz.U.2024 poz. 1087)
- Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2024 poz. 1361)
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U.2024 poz. 54 ze zm.)
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U.2024 poz. 1130)
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U.2024 poz. 1112)
- Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U.2024 poz. 725 ze zm.)
- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. z 2024 r. poz. 1290)

### 10.2. Normy

- EN 1997-2:2024 Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground properties
- PN-B-06050:1999 Geotechnika - Roboty ziemne - Wymagania ogólne

PN-EN ISO 14688-1:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne - Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów - Część 1: Oznaczenie i opis

PN-EN ISO 14689:2018-05 Rozpoznanie i badania geotechniczne - Oznaczenie, opis i klasyfikowanie skał

PN-EN ISO 15875-2:2005 Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do instalacji wody ciepłej i zimnej -- Usieciowany polietylen (PE-X) -- Część 2: Rury

VDI 4640 Part 2: Thermal Use of the Underground – Ground Source Heat Pump Systems, Düsseldorf: VDI-Verlag

### **10.3. Literatura**

AKHMETOV B., GEORGIEV A.G., KALTAYEV A., DZHOMARTOV A.A., POPOV R., TUNGATAROVA M.S., 2016 - Thermal Energy Storage Systems - Review. Bulgarian Chemical Communications, Volume 48, Special Issue E (pp. 31 - 40) 2016.

ALBERDI-PAGOLA, M., 2018 - Design and performance of energy pile foundations: Precast quadratic pile heat exchangers for shallow geothermal energy systems. Aalborg Universitetsforlag. Ph.d.-serien for Det Ingeniørog Naturvidenskabelige Fakultet, Aalborg Universitet.

ALPTEKIN E., EZAN M. A., 2019 - Performance Investigations on a Sensible Heat Thermal Energy Storage (SHTES) Tank with a Solar Collector under Variable Climatic Conditions. Applied Thermal Engineering.

ANDERSEN J., BØDKERL., JENSEN M.V., 2013 - Large Thermal Energy Storage at Marstal District Heating. Important capacity of storage of thermal energy for collective heating of Marstal.

ANDERSSON O., Håkansson N., RYDELL L., 2021 - Heat pumps rescued Xylem's heat storage facility in Emmaboda, Sweden. REHVA Journal.

ANONGPHOUTH, A., MAGHOUL, P., ALFARO, M., 2020 - Geothermal Energy Pile-Soil Interaction Under Mechanical Loading And Thermal Cycles. International Journal of GEOMATE, Vol.18, Issue 70, pp. 1 – 8.

BADYDA K., BUJALSKI W., NIEWIŃSKI G., WARCHOŁ M., 2011 - Selected Issues Related to Heat Storage Tank Modelling and Optimisation Aimed at Forecasting Its Operation. Archives of thermodynamics Vol. 32 (2011), No. 3, 3–31.

BARALIS M., BARLA M., BOGUSZ W., DONNA A.D., RYŻYŃSKI G., ŻERUŃ M., 2018 - Geothermal potential of the NE extension Warsaw metro tunnels.

BARLA M., DONNA A.D., 2018 - Energy tunnels: concept and design aspects. Underground Space 3 (2018) 268–276.

BARLA, M., PERINO, A., 2015. Energy from geo-structures: a topic of growing interest. Environmental geotechnics, 2(1), 3-7

BASER, T., MCCARTNEY, J. S., OZDOGAN-DOLCEK, A., 2019 - Thermal Energy Storage in Borehole Arrays Installed in Unsaturated Soils. From Research to Applied Geotechnics.

BENNER M., BODMANN M., MANGOLD D., NUßBICKER J., RAAB S., SCHMIDT T., SEIWALD H., 2003 - Solar unters-tützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher (Nov. 98 bis Jan. 03), Forschungs-bericht zum BMWi-Vorhaben 0329606 S

- BERG A., GRIMM M., STERGIAROPOULOS K., 2017 - Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany. 12TH IEA Heat Pump Conference.
- BESPALKO S., MIRANDA A. M., HALYCHYI O., 2018 - Overview Of The Existing Heat Storage Technologies: Sensible Heat. Acta Innovations. Issn 2300-5599.
- BICKNELL, K., 2023 - Thermal Energy Storage Using High Temperature Borehole Heat Exchangers in Unconsolidated Materials. All Theses.
- BIERNATOWSKI K., 1984 - Fundamentowanie. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- BOGUSZ W. 2017 - Możliwość zastosowania fundamentów termoaktywnych w budownictwie mostowym. Mosty
- BORIS BOURDONCLE, 2020 - Inter-seasonal heat storage in the residential and tertiary sector: a way to reduce our carbon footprint.
- BOSENNEC C., SASS I., SEIB L., LANDAU M., PHAM T.H. 2023- MD-BTES construction and integration into a district heating grid: Insights and targets of SKEWS and PUSH-IT projects. EGU General Assembly 2023.
- BRANDL H. 2006 - Energy foundations and other thermo-active ground structures. Géotechnique, 56(2), 81-122
- BROWN C.S., DORAN H., KOLO I., BANKS D., FALCONE G., 2023 - Investigating the Influence of Groundwater Flow and Charge Cycle Duration on Deep Borehole Heat Exchangers for Heat Extraction and Borehole Thermal Energy Storage. Energies 2023, 16, 2677.
- BUHMANN P., MOORMANN C., WESTRICH B., PRALLE N., FRIEDEMANN W., 2016 - Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects. Geomechanics for Energy and the Environment.
- BUJOK P., GRYZC D., KLEMPA M., KUNZ A., PYTLIK A., ROZENHAL Z., VOJČINÁK P., 2013 - Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values. Proceedings of the ICE – Energy 64.
- BUKOWSKI M, ŚNIEGOCKI A., 2011 - Mix energetyczny 2050. Analiza scenariuszy dla Polski. Raport opracowany na zlecenie Ministerstwa Gospodarki w ramach umowy Nr II/183/P/75001/11/DGR przez Instytut Badań Strukturalnych i demosEUROPA – Centrum Strategii Europejskiej.
- CFMS, SYNTEC INGENIERIE, SOFFONS-FNTP, 2017 - Recommandations pour la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des géostructures thermiques.
- CHEŁMIŃSKI W., 1991 - Zmiany położenia zwierciadła wód gruntowych w cyklu rocznym w Polsce. Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Seria A: Geografia Fizyczna, Tom 42.
- CHMIELEWSKI A., KUPECKI J., SZABŁOWSKI Ł., FIJAŁKOWSKI K.J., ZAWIESKA J., BOGDZIŃSKI K., KULIK O. i ADAMCZEWSKI T., 2020 - Dostępne i przyszłe formy magazynowania energii, wyd. Fundacja WWF Polska, ISBN: 978-83-60757-55-0.
- DAHASH A., OCHS f., GIULIANI G., TOSATTO A., 2021 - Understanding The Interaction Between Groundwater And Large-Scale. Sustainable Cities and Society 71 (2021) 102928.
- DAHASH A., OCHS F., TOSATTO A., STREICHER W., 2020 - Toward Efficient Numerical Modeling And Analysis Of Large-Scale Thermal Energy Storage For Renewable District Heating. Applied Energy 279 (2020) 115840.

DELTA ENERGY & ENVIRONMENT LTD., 2016 - Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies. Prepared for BEIS by Delta Energy & Environment Ltd.

DEPARTMENT FOR BUSINESS, ENERGY AND INDUSTRIAL STRATEGY, 2016 - Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies Acknowledgements, Prepared for BEIS by Delta Energy & Environment Ltd.

DESMEDT J., HOES H., VAN BAEL J., 2006 - Status of Underground Thermal Energy Storage in Belgium. VITO NV.

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR, 2023 - Thermische Energiespeicher für Quartiere - Aktualisierung, Überblick zu Rahmenbedingungen, Marktsituation und Technologieoptionen für Planung, Beratung und politische Entscheidungen im Gebäudesektor.

DOMAŃSKI R., 1983 - Możliwości i problemy magazynowania energii cieplnej. Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej Nr 62.

DONG S., LI X., TANG A. M., PEREIRA J. M., NGUYEN T., CHE P., XIONG Z., 2020 - Thermo-mechanical behavior of energy diaphragm wall: physical and numerical modelling.

EUROS ENERGY, 2022 - Rekomendacja Wykonawcy – dobre praktyki transformacji systemu ciepłowniczego w kierunku OZE.

EUROS ENERGY, 2024 – Ciepłownia OZE wraz z systemem sezonowych magazynów ciepła – Euros Energy HC Plant. Raport wykonany w ramach przedsięwzięcia nr 72/21/PU – Ciepłownia Przyszłości, czyli system ciepłowniczy z OZE.

FIorentini M., Vivian J., Heer P., Baldini L., 2022 - Design And Optimal Integration Of Seasonal Borehole Thermal Energy Storage In District Heating And Cooling Networks.

FRAZZICA A., PALOMBA V., FRENI A., 2023 - Development and Experimental Characterization of an Innovative Tank-in-Tank Hybrid Sensible–Latent Thermal Energy Storage System. *Energies* 2023, 16, 1875.

GAO Q., LI M., YU M., SPITLER J. D., YAN Y.Y., 2008 - Review of Development from GSHP to UTES in China and Other Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1383–1394.

GAUTHIER G., 2020 - Benchmarking and improving models of subsurface heat storage dynamics, comparison of Danish PTES and BTES installation measurements with their corresponding TRNSYS models.

GEHLIN S., 2016 - Borehole Thermal Energy Storage. Swedish Centre for Shallow Geothermal Energy, Lund, Sweden.

GIORDANO N., COMINA C., MANDRONE G., CAGNI A., 2015 - Borehole Thermal Energy Storage (BTES). First Results From The Injection Phase of a Living Lab in Torino (NW Italy). *Renewable Energy* 86 (2016) 993-1008. Hindawi, eofluids, Volume 2019, Article ID 4961781, 26 pages.

GONET A., ŚLIWA T. 2005 - Theoretical model of borehole heat exchanger. *Journal of energy resources technology* 127(2): 142–148.

GONET A., ŚLIWA T., HENDEL J., 2012 - Magazynowanie w górotworze ciepła pochodzącego z różnych źródeł. *AGH DRILLING OIL GAS* Vol. 29, No.1.

- GRYCZ D., HEMZA P., ROZEHNAL Z., 2013 - Charging of the experimental high temperature BTES via CHP unit - early results. *Energy Procedia* 48 ( 2014 ) 355 – 360
- GUO F., ZHU X., LI P., YANG X., 2022 - Low-grade Industrial Waste Heat Utilization In Urban District Heating: Simulation-Based Performance Assessment Of A Seasonal Thermal Energy Storage System. Volume 239.
- GUTERCH B, LEWANDOWSKA-MARCINIAK H., 2002 - Seismicity and seismic hazard in Poland. *Folia Quater* 73:85–99
- GUTERCH B., 2009 - Sejsmiczność Polski w świetle danych historycznych. *Przegląd Geologiczny* Vol. 57 No. 6 (2009).
- HAHN F. (red.), 2019: Monitoring plans: demonstration projects and case studies. HEATSTORE project report, GEOTHERMICA – ERA NET Cofund Geothermal. 29 pp
- HAŁAJ E., KOTYZA J., HAJTO M., PEŁKA G., LUBOŃ W., JASTRZĘBSKI P., 2021 - Upgrading a District Heating System by Means of the Integration of Modular Heat Pumps, Geothermal Waters, and PVs for Resilient and Sustainable Urban Energy. *Energies*.
- HAURYŁKIEWICZ, J., 2005 - Niektóre nieprawidłowości w obliczeniach czasu przesączania wody podziemnej przez pakiet warstw w strefie saturacji. *Przegląd Geologiczny*, vol. 53, nr 8.
- HELLSTRÖM G., 2012 - UTES Experiences from Sweden. Lund University, Sweden. NeoEnergy Sweden Ltd.
- HOLMBERG, H., 2009 - Analysis of Geo-Energy System with Focus on Borehole Thermal Energy Storage. Lund University, Sweden.
- HOSSEINI B., Ali NAMAZIAN A., 2012 - An Overview Of Iranian Ice Repositories, An Example Of Traditional Indigenous Architecture.
- IEA ECES, 1997 - Underground Thermal Energy Storage. Procedures for Environmental Impact Assessment. Working report.
- IEA ECES, 2018 - Applications of Thermal Energy Storage in the Energy Transition – Benchmarks and Developments. Public Report of IEA ECES Annex 30, September 2018. IEA Technology Collaboration Programme on Energy Conservation through Energy Storage.
- IEA, 2022 - Buildings, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/buildings>, License: CC BY 4.0.
- INSTYTUT ENERGETYKI ODNAWIALNEJ, 2022 – Projektowanie i Optymalizacja Systemu Ciepłowniczego z OZE i Magazynami Ciepła. Wykorzystanie Metodologii „Digital Twin” i Modelowania TRNSYS.
- JENSEN L. L., RUTZ D., DOCZEKAL C., GJORGIEVSKI V., BATAS-BJELIC I., KAZAGIC A., ADEMOVIC A., SUNKO R., DUIĆ N., PUKŠEC T. 2016 - Best Practice Examples of Renewable District Heating and Cooling. Market uptake of small modular renewable district heating and cooling grids for communities. WP 2 – Task 2.1 / D 2.1.
- JENSEN M. V. 2014 - Seasonal pit heat storages - Guidelines for materials & construction. IEA-SHC Tech Sheet 45.B.3.2.
- KALLESØE A.J., VANGKILDE-PEDERSEN T., 2019 - Underground Thermal Energy Storage (UTES) – State-of-The-Art, Example Cases and Lessons Learned. HEATSTORE Project Report, GEOTHERMICA – ERA NET Cofund Geothermal. 130 pp + appendices.

KALOYANOV N. G., TSEKOV R. P., PENKOVA N. Y., 2023 - Temperature Stratification in Water Thermal Energy Storage Tanks At Different Charging Modes. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.

KIM W., KIM Y.K., 2018 - Parametric Study on The Size of Short-Term Storage Tank for a Seasonal Borehole Thermal Energy Storage . GRAND RENEWABLE ENERGY, Japan.

KIZILKAN, Ö., DINCER, I., 2013 - Evaluation of Thermal Characteristics of a Borehole Thermal Energy Storage System. Proceeding of the Sixth International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-6).

KŁONOWSKI M., KOCYŁA J., RYŻYŃSKI G., ŻERUŃ M., 2020 - Evaluation and statistical interpretation of low-temperature geothermal energy potential for selected locations in Poland. Geological Quarterly, Vol. 64 No. 2 (2020).

KOPEĆ P., 2015 - Obliczenia i Dobór Gruntowego Wymiennika Ciepła dla Pompy Ciepła. Czasopismo Inżynierii Lądowej Środowiska i Architektury, JCEFAM t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec, s. 167-176.

KORHONEN, K., LEPPÄHARJU, N., HAKALA, P., AROLA, T., 2018 - Simulated temperature evolution of large BTES - case study from Finland. Conference Paper · September 2018 IGSHPA SWEDEN .

KOWALSKI T., RUVCESKA A., ŚLIWA T., BIEDA A., 2017 - Comparative Analysis of Using Borehole Heat Exchangers in Macedonia and in Poland. AGH DRILLING OIL GAS Vol. 34, No.1.

KUBIŃSKI K., SZABŁOWSKI Ł., 2020 - Dynamic model of solar heating plant with seasonal thermal energy storage. Renewable Energy.

KÜBLER R., FISCH N., HAHNE E., 1997 - High temperature water pit storage projects for the seasonal storage of solar energy. Solar energy 61(2):97-105 DOI: 10.1016/S0038-092X(97)00040-6

LALOUI L., ROTTA LORIA A.F., 2019 - Analysis and Design of Energy Geostructures, Theoretical Essentials and Practical Application. Elsevier Inc.

LALOUI L., SUTMAN M., 2019 - Energy geostructures: a new era for geotechnical engineering practice. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering foundation of the future.

LEE K.S., 2013 – Underground Thermal Energy Storage. Springer. London.

LEED, 2022 - LEED® case study The Circle. Zurich Airport.

MACA N., 2017 - Geotermia niskich temperatur jako energia przyszłości. Termoaktywne konstrukcje inżynierskie jako narzędzie jej wykorzystania , XXII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 7 ÷ 10 marca 2017. Kraków: Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział Małopolski (2017), tom II, s. 37-56.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z. (red.), BARAŃSKI M., BESTYŃSKI Z., OSTROWSKI S., PASIECZNA A., PIETRZYKOWSKI P., PRZYŁUCKA M., BŁACHNIO O., CHADA M., CZARNIAK P., DZIEKAN-KAMIŃSKA E., JAROS M., JUDKOWIAK M., ŁUKAWSKA A., MAJER K., PACANOWSKI G., PIECHOTA A., ROGUSKI A., RYŻYŃSKI G., SAMEL I., SOKOŁOWSKI J., SZABŁOWSKA M., SZLASA M., 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7), Wydaw. PIG--PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M. (red.), FRANKOWSKI Z., ADAMUSZEK M., CZAPOWSKI G., FAJFER J., JAROSIŃSKI M., MAJER K., SZABŁOWSKA M., SAMEL I., WÓJCICKI A., MAZUREK S., ROSZKOWSKA-REMIN J., CYGLICKI M., KORZENIOWSKI W., ŁUKASIAK

D., 2022 – Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. Wyd. PIG-PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M. (red.), FRANKOWSKI Z., ADAMUSZEK M., CZAPOWSKI G., FAJFER J., JAROSIŃSKI M., MAJER K., SZABŁOWSKA M., SAMEL I., WÓJCICKI A., MAZUREK S., ROSZKOWSKA-REMIN J., CYGLICKI M., KORZENIOWSKI W., ŁUKASIAK D., 2023 – Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. Wydaw. PIG-PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M. (red.), FRANKOWSKI Z., RYŻYŃSKI G., MAJER K., PACANOWSKI G., LASOCKI M., ROGUSKI A., PIECHOTA A., CZARNIAK P., WASILEWSKI K., BARAŃSKI M., JAROS M., SZLASA M., JUDKOWIAK M., OSTROWSKI S., CYGLICKI M., 2021 – Wytyczne rozpoznania i badań podłoża budowlanego dla inwestycji kolejowych dużych prędkości. Wydaw. PIG-PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M., MAJER K., (red.), FRANKOWSKI Z., STAWICKA A., 2023 - Mapa geologiczno-inżynierska Polski w skali 1:50 000. Metodyka sporządzania, udostępniania i aktualizacji (stan na 31.03.2023). Wyd. PIG-PIB, Warszawa.

MAJER K., RYŻYŃSKI G. (red.) i in., 2022 – Atlasy geologiczno-inżynierskie w skali 1:10 000 lub mniejszej. Instrukcja wykonywania. PIG-PIB, Warszawa.

MAKASIS N., NARSILIO G.A., BIDARMAGHZ A. B., 2019 - Investigating the Thermal Performance of Energy Diaphragm Retaining Walls. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges.

MAKASIS N., NARSILIO G.A., 2022 - Investigating the thermal performance of energy soldier pile walls. Geomechanics for Energy and the Environment 30 (2022) 100242.

MANGOLD D., DESCHAIANTRE L., 2012 – Seasonal Thermal Energy Storage. Report on state of the art and necessary further R+D. SHC.

MANGOLD D., DESCHAIANTRE L., 2015 - Seasonal Thermal Energy Storage: Report on state of the art and necessary further R+ D. IEA SHC Task, 45.

MANIA T., KAWA J., 2015 - Systemy magazynowania energii ciepła i chłodu – praktyczne zastosowania.

MANIA T., KAWA J., 2016 - Inżynieria Instalacji Magazynowania Energii Ciepła. Red. Adam Mroziński.

MANONELLES J.J., 2014 - Large-Scale Underground Thermal Energy Storage -Using Industrial Waste Heat To Supply District Heating. Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior Grau d'Enginyeria Mecànica.

MATOS C.R., CARNEIRO J.F. SILVA P.P. 2019 – Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. Journal of Energy Storage 21, pp. 241–258.

MENÉNDEZ J., ORDÓÑEZ A., ÁLVAREZ R., LOREDO J., 2019 - Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 108, July 2019, p. 498-512.

MIDTTØMME K., HAUGE A., 2009 - Underground Thermal Energy Storage (UTES) With Heat Pumps In Norway.

- MIECZNIK M., 2016 - Podziemne magazynowanie energii cieplnej–metody i zastosowania. Przegląd Geologiczny, 64 (7), 464-471.
- MIELKE P., BAUER D., HOMUTH S., GOTZ A.E., SASS I., 2014 - Thermal Effect of a Borehole Thermal Energy Store on the Subsurface. Geothermal Energy 2014, 2:5.
- MINKIEWICZ, T., 2023 - Przegląd i rola magazynów ciepła w polskich systemach ciepłowniczych. Rynek Energii, 2023 Nr 1(164).
- MOHAMAD Z., FARDOUN F., MEFTAH F., 2021 - A review on energy piles design, evaluation, and optimization. Journal of Cleaner Production, 2021, 292.
- MONZÓ, P., LAZZAROTTO, A., ACUÑA, J., 2017 - First Measurements of a Monitoring Project on a BTES System. IGSHPA Technical/Research Conference and Expo Denver.
- MONZÓ, P., LAZZAROTTO, A., ACUÑA, J., TJERNSTRÖM, J., NYGREN, M., 2016 - Monitoring of a large borehole thermal energy storage in Sweden. Conference: In Proceedings of the 12th REHVA World Congress CLIMAAAt: Aalborg.
- MORAWSKI W. (red.), CWOJDZIŃSKI S., DANIEL W., GAŁĄZKA D., GAŁKOWSKI P., GASTOŁ-PALECHOWSKA B., GOGOŁEK W., GRABOWSKI D., GRANICZNY M., GRUSZCZYŃSKA E., KAMIŃSKI M., KOCYŁA J., KRAJEWSKA A., LISICKI S., MALATA T., MARCINKOWSKI B., MARKS L., MORAWSKI W., PACIURA W., PIOTROWSKA E., PIOTROWSKA K., POCHOCKA-SZWARC K., PRZASNYSKA J., PRZYBYLSKI B., ROSOWIECKA O., RUBINKIEWICZ J., SALWA S., SŁODKOWSKA B., STAŃCZAK Z., STĘPIEŃ U., TEKIELSKA A., ZABIELSKI R., ŻARSKI M., 2018 - Metodyka Opracowania i Reambulacji Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski W Skali 1:50 000, wydanie II poprawione i uzupełnione. Wydaw. PIG-PIB, Warszawa.
- NARULA K., FILHO DE OLIVEIRA F., VILLASMIL W., PATEL M.K., 2020 - Simulation method for assessing hourly energy flows in district heating system with seasonal thermal energy storage, Renew. Energy 151 (2020) 1250–1268,
- NICHOLSON, D. P., CHEN, Q., SILVA, M. D., WINTER, A., WINTERLING, R., 2014 - THE DESIGN OF THERMAL TUNNEL ENERGY SEGMENTS FORCROSSRAIL. ICE Publishing.
- NILLSON E., ROHDIN P., 2019 - Performance Evaluation of an Industrial Borehole Thermal Energy Storage (BTES) Project - Experiences From The First Seven Years of Operation. Renewable Energy 143 (2019) 1022-1034.
- NORDELL B., 2000 - Large-scale Thermal Energy Storage. Division of Water Resources Engineering, Luleå University of Technology SE-97187 Luleå.
- NORDELL B., ANDERSSON O., RYDELL L., SCORPO A. L., 2015 - Long-term Performance of the HT-BTES in Emmaboda, Sweden. Conference Greenstock.
- NORDELL B., SCORPO A. L., ANDERSSON O., RYDELL L., 2014 – The HT BTES plant in Emmaboda, Luleå University of Technology
- NORDELL B., SCORPO A. L., ANDERSSON O., RYDELL L., 2016 - Long Term Evaluation of Operation and Design of the Emmaboda BTES: Operation and Experiences 2010-2015.
- OCHS F., FAHASH A., TOSATTO A., JANETTI M.B., 2020 V-Techno-Economic Planning And Construction Of Cost-Effective Largescale Hot Water Thermal Energy Storage For Renewable District Heating Systems. Renewable Energy.

- OCHS F., MARX R., HEDIEMANN W., Müller-Steinhagen H., Stuttgart d., 2008 - Solar assisted district heating system with seasonal thermal energy storage in Eggenstein-Leopoldshafen. EuroSun 2008, Lisboa.
- OSZCZAK W., 2011 - Ogrzewanie Domów z Zastosowaniem Pomp Ciepła. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- PAGACZEWSKI J., 1972 - Catalogue of earthquakes in Poland 1000-1970 Years. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 51, 61 pp.
- PAHUD D., HUBBUCH M., 2007 - Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zürich Airport. Proceedings European Geothermal Congress 2007
- PAKSOY H., 2007 - Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, Fundamentals, Case Studies and Design.
- PAN, X., XIANG, Y., GAO, M., FAN, J., FURBO, S., WANG, D., XU, C., 2022 - Long-term thermal performance analysis of a large-scale water pit thermal energy storage. Journal of Energy Storage 52 (2022), 105001.
- PAUSCHINGER T., SCHMIDT T., SOERENSEN P.E., SNIJDERS A., DJEBBAR R., BOULTER R., THORNTON J., 2018 - Design Aspects for Large-Scale Aquifer and Pit Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. IEA DHC.
- PAVLOV G., OLESEN B., 2011 - Seasonal solar thermal energy storage through ground heat exchanger- Review of systems and applications, Proceedings of the 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Croatia, Dubrovnik, 2011.
- PAZDRO Z., 1983 - Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa.
- PENTTILÄ, J., ACUÑA, J., MONZÓ, P., 2014 - Temperature Stratification Of Circular Borehole Thermal Energy Storages. Conference: The 11th International Energy Agency Heat Pump Conference At: Montreal 2014.
- PETERSON, E. L., SHAFAGH, I., 2022 - Evaluation of diaphragm wall heat exchanger potential. Energy & Buildings.
- PIOTROWICZ B., JASTRZĘBSKA M., ŁUPIEŻOWIEC M., 2018 - Determination of the heating pile numerical model parameters based on the laboratory strength tests of clay at low temperatures. Warsaw University of Life Sciences – SGGW.
- PIOTROWSKA-WORONIAK J., 2021 - Assessment of Ground Regeneration around Borehole Heat Exchangers between Heating Seasons in Cold Climates: A Case Study in Białystok (NE, Poland). Energies 2021, 14, 4793.
- PISARCZYK S., 2001 – Gruntoznawstwo Inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- PLANENERGI, 2019 - Best Practice for implementation and operation of large scale Borehole and Pit Heat Thermal Storages Based on Danish experiences.
- RAD F.M., FUNG A.S., 2016 - Solar community heating and cooling system with borehole thermal energy storage – Review of systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews
- RADSPIELER M., ZACHMEIER P., SCHWEIGLER C., 2013 - Application Of Customized Absorption Heat Pumps With Heating Capacities Above 500 Kw Project: Ackermannbogen, Munich. Chapter 3: Thermally Driven Heat Pumps for Heating.

- REUSS M., 2015 - The Use of Borehole Thermal Energy Storage (BTES) Systems. Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern), Germany.
- ROTTA LORIA F., 2020 - Energy geostructures: Theory and application. E3S Web of Conferences 205, 01004 (2020).
- RUBIK M., 2006 - Pompy Ciepła. Poradnik. Ośrodek Informacji Technika Instalacyjna w Budownictwie, Warszawa.
- RUBIK M., 2011 - Pompy Ciepła w Systemach Geotermii Niskotemperaturowej. Multico Oficyna Wydawcza.
- RUI Y., YIN M., 2020 - Finite element modeling of thermo-active diaphragm walls. Front. Struct. Civ. Eng. 2020, 14(3): 646–663.
- RUMMING K., ECKERT A., 2004 - Hannover Kronsberg Handbook. Planning and Realisation.
- RYŻYŃSKI G., BOGUSZ W., 2016 - City-scale perspective for thermoactive structures in Warsaw.
- RYŻYŃSKI R., KOZDRÓJ W., SZLASA M. (red.), 2023 - Instrukcja wykonywania map potencjału i uwarunkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej. Wydaw. PIG-PIB, Warszawa.
- SANI, A. K., SINGH, R. M., 2020 - Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile. Renewable Energy.
- SAPIŃSKA-ŚLIWA A., ROSEN M.A., GONET A., KOWALCZYK J., ŚLIWA T., 2019 - A New Method Based on Thermal Response Tests for Determining Effective Thermal Conductivity and Borehole Resistivity for Borehole Heat Exchangers. Energies 2019, 12, 1072.
- SARBU I., SEBARCHIEVICI C. 2018 - A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability 2018, 10, 191.
- SCHMIDT T., PAUSCHINGER T., SØRENSEN P.A., SNIJDERS A., DJEBBAR R., 2018 -Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. Energy Procedia 00 (2017) 000–000.
- SCHNEIDER M., MOORMANN C., 2010 - GeoTU6 – a geothermal Research Project for Tunnels. Tunnel 02/2010.
- SCHULTE D.O., RÜHAAK W., WELSCH B., SASS I., 2016 - BASIMO – Borehole Heat Exchanger Array Simulation and Optimization Tool. Energy Procedia 97 ( 2016 ) 210 – 217.
- SIBBITT B., MCCLENAHAN D. 2015 - Seasonal Borehole Thermal Energy Storage – Guidelines for design & construction IEA-SHC TECH SHEET 45.B.3.1.
- SIFNAIOS, I., JENSEN, A. R., FURBO, S., FAN, J., 2023 - Heat losses in water pit thermal energy storage systems in the presence of groundwater. Applied Thermal Engineering.
- SKARPHAGEN H., BANKS D., FRENGSTAD B.S., GETHER H., 2019 - Design Considerations for Borehole Thermal Energy Storage (BTES): A Review with Emphasis on Convective Heat Transfer.
- SŁOMCZYŃSKA K., MIREK P., PANOWSKI M., 2022 - Solar Heating for Pit Thermal Energy Storage – Comparison of Solar Thermal and Photovoltaic Systems in TRNSYS 18. Advances in Science and Technology Research Journal 2022, 16(5), 40–51.
- SOCACIU, L., 2012 - SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE CONCEPTS. Applied Mathematics and Mechanics.
- SOLITES, 2016 - Guideline for Seasonal Thermal Energy Storage Systems in the Built Environment.

- SOLON J., BORZYSZKOWSKI J., BIDŁASIK M., RICHLING A., BADORA K., BALON J., BRZEZIŃSKA-WÓJCIK T., CHABUDZIŃSKI Ł., DOBROWOLSKI R., GRZEGORCZYK I., JODŁOWSKI M., KISTOWSKI M., KOT R., KRAŻ P., LECHNIO J., MACIAS A., MAJCHROWSKA A., MALINOWSKA E., MIGOŃ P., MYGA-PIĄTEK U., NITA J., PAPIŃSKA E., RODZIK J., STRZYŻ M., TERPIŁOWSKI S., ZIAJA W., 2018 - Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data, *Geographia Polonica*, nr 91/2, 2018, s. 143–170.
- STERPI D., ANGELOTTI A., HABIBZADEH-BIGDARVISH O., JALILI D., 2018 - Assessment of thermal behaviour of thermo-active diaphragm walls based on monitoring data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- STERPI D., COLETTI A., MAURI L., 2016 - Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses. *Geomechanics for Energy and the Environment* Volume 9, March 2017, Pages 1-20.
- ŚLIWA T., GAWEŁ M., PIOTROWSKA N., 2014 - System Otworowych Wymienników Ciepła z Bezpośrednim Parowaniem Czynnika Grzewczego w Pałecznicy. *GLOBEnergia Akademia Viessmann*.
- ŚLIWA T., GONET A., 2011 - Otworowe Wymienniki Ciepła Jako Źródło Ciepła Lub Chłodu Na Przykładzie Laboratorium Geoenergetyki WWNIG AGH. *WIERTNICTWO NAFTA GAZ*, Tom 28, Zeszyt 1-2.
- ŚLIWA T., GONET A., SAPIŃSKA-ŚLIWA A., ZŁOTKOWSKI A., 2018 - Laboratorium Geoenergetyki – 10 lat działalności na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój* nr 1/2018.
- ŚLIWA T., GONET A., SKOWROŃSKI G., 2011 - Największa w Polsce Instalacja Grzewczo-Chłodnicza Bazująca na Otworowych Wymiennikach Ciepła. *WIERTNICTWO NAFTA GAZ*, Tom 28, Zeszyt 3.
- ŚLIWA T., KOTYZA J., 2003 - Application of existing wells as ground heat source for heat pumps in Poland. *Applied Energy* 74 (2003) 3–8.
- ŚLIWA T., LEŚNIAK P., SAPIŃSKA-ŚLIWA A., ROSEN M.A., 2022 - Effective Thermal Conductivity and Borehole Thermal Resistance in Selected Borehole Heat Exchangers for the Same Geology. *Energies* 2022, 15, 1152.
- ŚLIWA T., SKOWROŃSKI D., GONET A., SAPIŃSKA-ŚLIWA A., 2012 - Rock Mass Thermal Analysis in Underground Thermal Energy Storage (UTES). *AGH DRILLING OIL* Vol. 29, No.2
- WANG, H. AND QI, C., 2011 - A laboratory experimental study of high-temperature thermal storage in the unsaturated soil using a vertical borehole heat exchanger. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 6, Issue 3, Pages 187–192, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctr006>.
- WELSCH B., GÖLLNER-VÖLKER L., SCHULTE D. O., BÄR K., SASS I., SCHEBEK L., 2018 - Environmental and economic assessment of borehole thermal energy storage in district heating systems. *Applied Energy* 216 (2018) 73-90.
- WELSCH, B., RÜHAAK, W., SCHULTE, D. O., BÄR, K., HOMUTH, S., SASS, I., 2015 - A Comparative Study of Medium Deep Borehole Thermal Energy Storage Systems Using Numerical Modelling. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.

- WELSCH, B., RÜHAAK, W., SCHULTE, D. O., BÄR, K., SASS, I., 2016 - Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage. *International Journal Of Energy Research*.
- WIŚNIEWSKA M., FORYSIAK J., 2014 - Źródła Ciepła Niskotemperaturowego Dostępnego dla Gruntowych Pionowych Wymienników Ciepła. Uwarunkowania Środowiskowe i Techniczne. *ACTA UNIVERSITATIS LODZIENSIS, FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA* 13, 2014.
- WOŁOSZYN J., 2014 - Badania Wpływu Rozmieszczenia Wymienników na Efektywność Podziemnych Magazynów Energii. Praca doktorska, AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki.
- XIANG Y., XIE Z., FURBO S., GAO M., FAN J., 2022 - A comprehensive review on pit thermal energy storage: Technical elements, numerical approaches and recent applications. *Journal of Energy Storage*. DOI: 10.1016/j.est.2022.105716
- XIE Z., XIANG Y., WANG D., KUSYY O., KONG W., FURBO S., i in., 2021 - Numerical investigations of long-term thermal performance of a large water pit heat storage, *Sol. Energy* 224 (2021) 808–822.
- XU, Y., GUO, Y., WANG, H., WANG, B., ZHAO, Y., SHEN, J., 2023 - Influences of seasonal changes of the ground temperature on the performance of ground heat exchangers embedded in diaphragm walls: A cold climate case from North China. *Renewable Energy*.
- XU, Y., ZENG, Z., SUN, D., 2022 - Experimental and numerical investigation on the effect of heat and moisture coupling migration of unsaturated lateritic clay for the soil thermal storage system. *Energy & Buildings*.
- YUTONG XIANG Y., XIE Z., FURBO S., WANG D., GAO M., FAN J., 2022 -, A Comprehensive Review On Pit Thermal Energy Storage: Technical Elements, Numerical Approaches And Recent Applications.
- ZAWADZKI M., 2003 - Kolektory Słoneczne, Pompy Ciepła - Na Tak. SolarTeam Mirosław Zawadzki.
- ZHANG P., LIU M., LI Z., LV Q., SUN Z., ZHANG Q., LIU X., 2022 - Simulation and Analysis of the Thermal-Mechanical Response of an Energy Pile. *GeoScienceWorld Lithosphere Volume 2022*, Article ID 5506908, 17 pages.
- ZHONG Y., NARSILIO G. A., MAKASIS N., SCOTT C., 2022 - Experimental and numerical studies on an energy piled wall: The effect of thermally activated pile spacing. *Geomechanics for Energy and the Environment* 29 (2022) 100276.
- ZHU C., ZHANG J., WANG Y., DENG Z., SHI P., WU J., WU Z., 2022 - Study on Thermal Performance of Single-Tank Thermal Energy Storage System with Thermocline in Solar Thermal Utilization. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3908.
- ZHU, F., ZHOU, Y., ZHU, S., 2021 - Experimental study on heat transfer in soil during heat storage and release processes. *Heat and Mass Transfer*, 57:1485–1497.
- ZŁOTKOWSKI A., ŚLIWA T., GONET A., 2011 - Otworowe Wymienniki Ciepła w Instalacji Grzewczo-Klimatyzacyjnej Ekologicznego Parku Edukacji i Rozrywki OSSA. *WIERTNICTWO NAFTA GAZ*, Tom 28, Zeszyt 1-2.
- ZWIERZCHOWSKI R., 2017 - Characteristics of Large Thermal Energy Storage Systems in Poland. *E3S Web of Conferences* 22, 00206 (2017).

ZWIERZCHOWSKI R., 2019 - Improvement of Operation of Steam Cushion System For Sensible Thermal Energy Storage. E3S Web of Conferences 116, 00107 (2019).

ZWIERZCHOWSKI R., WOŁOWICZ M., 2020 - Energy and Exergy Analysis of Sensible Thermal Energy Storage-Hot Water Tank for a Large CHP Plant in Poland, Energies, vol. 13, nr 18, 2020.

ŻERUŃ M., JAGODA E., MAJER E., ŁUKAWSKA A., MAJER K., RYŻYŃSKI G., SAMEL I., 2024 - Adaptation of Engineering-Geological Database for Very Shallow Geothermal Potential Mapping of the Urban Areas. Case study: Warsaw. 49th Stanford Geothermal Workshop, Stanford, 12-14.02.2024 r.

ŻERUŃ M., MAJER E., RYŻYŃSKI G., 2022 - Geotermia inżynierska – możliwości zastosowania technologii OZE w budownictwie. XXXVI Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 28.06 - 1.07. 2022 r.

#### **10.4. Strony internetowe**

źródło internetowe, <https://actu.epfl.ch/news/engineering-heat-out-of-metro-tunnels/>), dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://krakow.wyborcza.pl/krakow/7,44425,26355647,najwieksza-przeprowadzka-w-historii-archiwow-panstwowych.html>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://lkab.com/en/news/lkab-wassara-finalist-in-helsinki-energy-challenge>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://clc.gios.gov.pl/index.php/o-clc/legenda>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://sdg21.eu/en/db/solare-nahwaerme-ackermannbogen>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/>; Esri Basemap, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://spielplatznet.de/spielplatz/260/Hannover/Kletterspielplatz>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://stadt.muenchen.de/>), dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.energy-xprt.com/products/munich-model-6-000-000-litres-bespoke-tank-222847>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.epfl.ch/labs/lms/research-research-fields-energy-ressources/>), dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.gov.pl/attachment/a81cd2ea-0d8d-43fc-a984-7cbdf921e353>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/default-cb84adc317-8>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.saisonalspeicher.de/>), dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://www.sator.pl/pl/energia/ikea-szczecin--wykonanie-otworow-wiertniczych-celem-wykorzystania-ciepla-ziemi,495.html>, dostęp: 30.11.2024

źródło internetowe, <https://bdot10k.geoportal.gov.pl/>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://geologia.pgi.gov.pl/>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://geoserwis.gdos.gov.pl/>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://heatroadmap.eu/peta4/>, dostęp: 15.05.2023 r.

źródło internetowe, <https://stateofgreen.com/en/solutions/lid-solution-for-ptes-in-dronninglund-denmark/>, dostęp: 31.03.2024 r.

źródło internetowe, [https://wody.isok.gov.pl/imap\\_kzgw/](https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/), dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.energy-xprt.com/products/munich-model-6-000-000-litres-bespoke-tank-222847>, dostęp: 31.03.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.euowater.com/pl/przyk%C5%82ady/energetyka-i-ciep%C5%82ownictwo/uzdatnianie-wody-i-energia-solarna>, dostęp: 31.03.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.geoportal.gov.pl/>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/13168-baza-danych-geologiczno-inzynierskich.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/13169-mapa-geologiczno-inzynierska-polski-w-skali-1-50-000.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/15623-btes.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/15624-mapa-potencjalu-geotermii-niskotemperaturowej.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/4-geotermia/geotermia-plytka.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

źródło internetowe, <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/baza-wiedzy/15396-publicacje-ksiazkowe.html>, dostęp: 30.11.2024 r.

## 11. Spis rysunków

RYSUNEK 1 ROZMIESZCZENIE GRUNTOWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA (SKARPHAGEN, 2019) A) LINIOWA KONFIGURACJA GĘSTO ROZMIESZCZONYCH OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA CECHUJE SIĘ OGRANICZONĄ EFEKTYWNOŚCIĄ W ZAKRESIE MAGAZYNOWANIA CIEPŁA, CO WYNIKA Z DUŻEGO OBWODU UKŁADU, PRZEZ KTÓRY MOŻLIWE SĄ ZNACZNE STRATY CIEPŁA, B) BARDZIEJ ZWARTA GEOMETRIA UKŁADU, NP. SIATKA KWADRATOWA BHE, WYKAZUJE WYŻSZĄ EFEKTYWNOŚĆ W AKUMULACJI CIEPŁA, C) JESZCZE KORZYSTNIEJSZE PARAMETRY OSIĄGAJĄ UKŁADY O KSZTAŁCIE HEKSAGONALNYM LUB CYLINDRYCZNYM, CO JEST ZWIĄZANE ZE ZMNIEJSZAJĄCYM SIĘ STOSUNKIEM POWIERZCHNI DO OBJĘTOŚCI WRAZ ZE WZROSTEM SKALI UKŁADU .....	16
RYSUNEK 2 (A) ŁĄCZNA LICZBA GEOSTRUKTUR ENERGETYCZNYCH NA CAŁYM ŚWIECIE; (B) OSZCZĘDNOŚCI EMISJI CO <sub>2</sub> DZIĘKI TYM PROJEKTOM. STAN NA 2016 ROK (LALOU I ROTTA LORIA, 2019).....	21
RYSUNEK 3 PODZIAŁ TECHNOLOGII MAGAZYNOWANIA CIEPŁA .....	23
RYSUNEK 4 KOSZTY INWESTYCYJNE DLA RÓŻNYCH TECHNOLOGII MAGAZYNOWANIA CIEPŁA (SCHMIDT ET AL., 2018) .....	24
RYSUNEK 5 KONSTRUKCJA I ZASADY DZIAŁANIA BTES (ANG. BOREHOLE THERMAL ENERGY STORAGE) .....	25
RYSUNEK 6 PRZYŁĄCZA OD PIONOWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA W MAGAZYNIE BTES PODCZAS KONSTRUKCJI W DRAMMEN (NORWEGIA) (HTTPS://LKAB.COM/EN/NEWS/LKAB-WASSARA-FINALIST-IN-HELSINKI-ENERGY-CHALLENGE/) .....	25

RYSUNEK 7 MONTAŻ PIONOWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA NA POTRZEBY MAGAZYNOWANIA CIEPŁA DLA SKLEPU WIELKOPOWIERZCHNIOWEGO IKEA SZCZECIN ( <a href="https://www.sator.pl/pl/energia/ikea-szczecin--wykonanie-otworow-wiertniczych-celem-wykorzystania-ciepla-ziemi,495.html">HTTPS://WWW.SATOR.PL/PL/ENERGIA/IKEA-SZCZECIN--WYKONANIE-OTWOROW-WIERTNICZYCH-CELEM-WYKORZYSTANIA-CIEPLA-ZIEMI,495.HTML</a> ) .....	26
RYSUNEK 8 ROZMIESZCZENIE ODWIERTÓW GEOTERMALNYCH, POŁĄCZEŃ POZIOMYCH ORAZ STUDNI ROZDZIELACZOWYCH MAGAZYNU CIEPŁA BTES POD ZBIORNIKIEM PTES W CIEPŁOWNI PRZYSZŁOŚCI (EUROS ENERGY, 2024) .....	26
RYSUNEK 9 KONSTRUKCJA I ZASADY DZIAŁANIA PTES (ANG. PIT THERMAL ENERGY STORAGE A) SCHEMAT ŁADOWANIA MAGAZYNU, B) SCHEMAT ROZŁADOWYWANIA MAGAZYNU .....	28
RYSUNEK 10 MAGAZYN CIEPŁA PTES W LIDZBARKU WARMIŃSKIM PODCZAS MONTAŻU POKRYWY (EUROS ENERGY, 2024) .....	29
RYSUNEK 11 MAGAZYN CIEPŁA PTES W LIDZBARKU WARMIŃSKIM WRAZ Z POWIETRZNYMI POMPAMI CIEPŁA ZAINSTALOWANYMI NA WALE (EUROS ENERGY, 2024).....	29
RYSUNEK 12 MAGAZYN CIEPŁA PTES W VOJENS (DANIA) O POJEMNOŚCI 200 TYS. M <sup>3</sup> ( <a href="https://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/">HTTPS://SOLARHEATEUROPE.EU/2020/05/19/VOJENS-DISTRICT-HEATING/</a> ; ESRI BASEMAP).....	30
RYSUNEK 13 KONSTRUKCJA I ZASADY DZIAŁANIA TTES (ANG. TANK THERMAL ENERGY STORAGE) A) SCHEMAT ŁADOWANIA MAGAZYNU, B) SCHEMAT ROZŁADOWYWANIA MAGAZYNU .....	32
RYSUNEK 14 MAGAZYN CIEPŁA TTES WYKONANY NAD ZIEMIĄ I OBSYPANY (MONACHIUM, NIEMCY) (GOOGLE MAP STREET VIEW, <a href="https://sdg21.eu/en/db/solare-nahmwaerme-ackermannbogen">HTTPS://SDG21.EU/EN/DB/SOLARE-NAHWAERME-ACKERMANNBOGEN</a> ) .....	33
RYSUNEK 15 PODZIEMNY MAGAZYN CIEPŁA TTES W TRAKCIE BUDOWY (BENNER I IN., 2003) .....	33
RYSUNEK 16 KONSTRUKCJA ENERGETYCZNEJ ŚCIANY SZCZELINOWEJ .....	34
RYSUNEK 17 KONSTRUKCJA TUNELU ENERGETYCZNEGO .....	35
RYSUNEK 18 KONSTRUKCJA TERMOPALI.....	35
RYSUNEK 19 TUNEL ENERGETYCZNY, WIZUALIZACJA ( <a href="https://actu.epfl.ch/news/engineering-heat-out-of-metro-tunnels/">HTTPS://ACTU.EPFL.CH/NEWS/ENGINEERING-HEAT-OUT-OF-METRO-TUNNELS/</a> ) .....	36
RYSUNEK 20 TERMOPALE A) WIZUALIZACJA, B) KONSTRUKCJA TERMOPALA (ZBROJENIE Z WYMIENNIKAMI CIEPŁA) ( <a href="https://www.epfl.ch/labs/lms/research-research-fields-energy-ressources/">HTTPS://WWW.EPFL.CH/LABS/LMS/RESEARCH-RESEARCH-FIELDS-ENERGY-RESSOURCES/</a> ) .....	36
RYSUNEK 21 ARCHIWUM NARODOWE W KRAKOWIE – BUDYNEK WYKORZYSTUJĄCY TECHNOLOGIĘ PALI ENERGETYCZNYCH. ( <a href="https://krakow.wyborcza.pl/krakow/7,44425,26355647,najwieksza-przeprowadzka-w-historii-archiwow-panstwowych.html">HTTPS://KRAKOW.WYBORCZA.PL/KRAKOW/7,44425,26355647,NAJWIEKSZA-PRZEPROWADZKA-W-HISTORII-ARCHIWOW-PANSTWOWYCH.HTML</a> ) .....	37
RYSUNEK 22 LOKALIZACJA BTES W W EMMABODZIE W SZWECJI (ESRI BASEMAP) .....	41
RYSUNEK 23 ROZSTAW OTWORÓW W MAGAZYNIE CIEPŁA W EMMABODZIE (RAMSTAD I IN., 2022) .....	42
RYSUNEK 24 UPROSZCZONY SCHEMAT WYMIENNIKA KONCENTRYCZNEGO STOSOWANEGO W MAGAZYNIE BTES W EMMABODZIE.....	43
RYSUNEK 25 ZMIANA WYDAJNOŚCI SYSTEMU BTES W EMMABODZIE PO INSTALACJI POMP CIEPŁA. ( <a href="https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/default-cb84adc317-8">HTTPS://WWW.REHVA.EU/REHVA-JOURNAL/CHAPTER/DEFAULT-CB84ADC317-8</a> ).....	44
RYSUNEK 26 SCHEMAT ROZMIESZCZENIA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA W KONSTRUKCJI HT-BTES W PASKOVIE (WIDOK Z GÓRY) (GRYCH I IN., 2013) .....	45
RYSUNEK 27 UPROSZCZONY SCHEMAT WYMIENNIKA Z PODWÓJNĄ U-RURKĄ STOSOWANEGO W MAGAZYNIE BTES W PASKOVIE.....	46
RYSUNEK 28 ROZMIESZCZENIE OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA W MAGAZYNIE CIEPŁA BTES W BRÆDSTRUP (PLANENERGI, 2019).....	47
RYSUNEK 29 UPROSZCZONY SCHEMAT WYMIENNIKA Z PODWÓJNĄ U-RURKĄ STOSOWANEGO W MAGAZYNIE BTES W BRÆDSTRUP .....	48
RYSUNEK 30 KONSTRUKCJA IZOLACJI TERMICZNEJ W MAGAZYNIE BTES W BRÆDSTRUP (PLANENERGI, 2019) ..	48
RYSUNEK 31 SCHEMAT SYSTEMU CIEPŁOWNICZEGO W BRÆDSTRUP (HAHN (RED.), 2019) .....	49
RYSUNEK 32 WARSTWOWE UŁOŻENIE KOMPONENTÓW DEMONSTRATORA TECHNOLOGII POZWALA NA ZMNIEJSZENIE ZAJĘTOŚCI TERENU (MATERIAŁY WŁASNE EUROS ENERGY).....	49
RYSUNEK 33 SCHEMAT KONCEPCYJNY CIEPŁOWNI PRZYSZŁOŚCI (MATERIAŁY WŁASNE EUROS ENERGY) .....	50
RYSUNEK 34 WIDOK Z LOTU PTAKA NA INSTALACJĘ CIEPŁOWNI PRZYSZŁOŚCI. PO LEWEJ STRONIE WIDOCZNY MAGAZYN PTES. MAGAZYN BTES ZAJMUJE CAŁĄ POWIERZCHNIĘ DZIAŁKI INSTALACJI (EUROS ENERGY). 51	51
RYSUNEK 35 BUDOWA MAGAZYNU BTES - MONTAŻ STUDZIENEK ROZDZIELACZOWYCH I POŁĄCZEŃ POZIOMYCH (EUROS ENERGY) .....	51

RYSUNEK 36 ROZMIESZCZENIE ODWIERTÓW GEOTERMALNYCH, POŁĄCZEŃ POZIOMYCH ORAZ STUDNI ROZDZIELACZOWYCH GRUNTOWEGO MAGAZYNU CIEPŁA (EUROS ENERGY).....	52
RYSUNEK 37 MAGAZYN PTES PODCZAS BUDOWY (EUROS ENERGY).....	53
RYSUNEK 38 NAPEŁNIANIE WODĄ Z SIECI WODOCIĄGOWEJ (EUROS ENERGY) .....	53
RYSUNEK 39 WYKAŃCZANIE I ZABEZPIECZANIE WAŁÓW BASENU (EUROS ENERGY) .....	54
RYSUNEK 40 BUFOR SIECI CIEPŁOWNICZEJ - MAGAZYN KRÓTKOTERMINOWY – PRZED ZASYPANIEM (EUROS ENERGY) .....	55
RYSUNEK 41 LOKALIZACJA MUZEUM MARSZAŁKA JÓZEFA PIŁSUDZKIEGO ( <a href="https://mapy.geoport.al.gov.pl/">HTTPS://MAPY.GEOPORTAL.GOV.PL/</a> ).....	55
RYSUNEK 42 ROZSTAW ODWIERTÓW W MAGAZYNIE CIEPŁA BTES W INSTALACJI W SULEJÓWKU (EUROS ENERGY) .....	56
RYSUNEK 43 ZDJĘCIA Z BUDOWY MAGAZYNU BTES W SULEJÓWKU (EUROS ENERGY).....	57
RYSUNEK 44 SCHEMAT PROFILU GEOLOGICZNEGO W SULEJÓWKU .....	58
RYSUNEK 45 MONTAŻ INSTALACJI DTS W SULEJÓWKU (EUROS ENERGY) .....	59
RYSUNEK 46 SCHEMATYCZNY WYKRES TRASY ŚWIATŁOWODOWEJ Z PODZIAŁEM NA ODCINKI POMIAROWE (EUROS ENERGY).....	59
RYSUNEK 47 PRZYKŁADOWE WYNIKI ILUSTRUJĄCE ROZKŁAD TEMPERATUR WZDŁUŻ GŁĘBOKOŚCI ODWIERTÓW (EUROS ENERGY) .....	60
RYSUNEK 48 PRZYKŁADOWE WYNIKI ILUSTRUJĄCE ROZKŁAD TEMPERATUR W CZASIE DLA RÓŻNYCH GŁĘBOKOŚCI ODWIERTÓW (EUROS ENERGY) .....	60
RYSUNEK 49 BUDYNEK WIELORODZINNY NA ULICY BOGUSZA 9/11 W ZWOLENIU (EUROS ENERGY) .....	61
RYSUNEK 50 ROZSTAW OTWORÓW W MAGAZYNIE ENERGII CIEPLNEJ W ZWOLENIU, UL. BOGUSZA 9/11 (EUROS ENERGY) .....	62
RYSUNEK 51 SCHEMAT ODWIERTU W ZWOLENIU (EUROS ENERGY).....	63
RYSUNEK 52 PAŁAC FLORKIEWICZÓW W MŁOSZOWEJ .....	69
RYSUNEK 53 POLE A - TEREN POMIĘDZY PAWILONAMI A3 I A4 NA KAMPUSIE AGH W KRAKOWIE, A – LOKALIZACJA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA ORAZ KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH ŁADUJĄCYCH CIEPŁO DO GÓROTWORU, B – POMIESZCZENIE LABORATORYJNE Z INSTALACJĄ POMP CIEPŁA ORAZ DRY COOLER`EM, C – KOLEKTOR SŁONECZNY W POSTACI INSTALACJI OGRZEWOCZEJ DO ODŚNIEŻANIA W KONSTRUKCJI PARKINGU 250 M <sup>2</sup> , D – SALA AUDYTORYJNA.....	69
RYSUNEK 54 POLE B – TEREN POMIĘDZY PAWILONAMI A4 I D2 NA KAMPUSIE AGH W KRAKOWIE, A – LOKALIZACJA PIONOWYCH I UKOŚNYCH OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA, B – HORYZONTALNY USZCZELNIONY OTWOROWY WYMIENNIK CIEPŁA O DŁUGOŚCI 117 M, C – HORYZONTALNY NIEUSZCZELNIONY OTWÓR .....	70
RYSUNEK 55 POLE C – TEREN ZESPOŁU PAŁACOWO-PARKOWEGO W MŁOSZOWEJ, A - LOKALIZACJA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA, B – NEOGOTYCKI PAŁAC FLORKIEWICZÓW .....	71
RYSUNEK 56 ELEKTROWNIA SŁONECZNA Z SEZONOWYM MAGAZYNEM CIEPŁA PTES W DRONNINGLUND (GAUTHIER, 2020).....	72
RYSUNEK 57 WYSOKOŚĆ DYFUZORÓW ZAMONTOWANYCH PODCZAS INSTALACJI ZBIORNIKA W DRONNINGLUND (DAHASH I IN., 2020).....	73
RYSUNEK 58 ZDJĘCIE ZBIORNIKA W 2020 (NA GÓRZE) I 2022 ROKU (NA DOLE), WYMIANA POKRYWY (GOOGLE EARTH) .....	74
RYSUNEK 59 KONSTRUKCJA MAGAZYNU CIEPŁA PTES W EGGENSTEIN-LEOPOLDSHAFEN (PAUSHHINGER (RED.), 2018) .....	75
RYSUNEK 60 MAGAZYN CIEPŁA PTES W EGGENSTEIN-LEOPOLDSHAFEN PODCZAS KONSTRUKCJI (PAUSHHINGER (RED.), 2018).....	75
RYSUNEK 61 KOMPLEKS ZASILANY ENERGIĄ SŁONECZNĄ WRAZ Z MAGAZYNEM PTES (GOOGLE EARTH) .....	76
RYSUNEK 62 PRZYKŁADOWE ZAŁOŻENIA PRZY KALKULACJACH STATECZNOŚCI SKARP (ANDERSEN I IN., 2013)..	78
RYSUNEK 63 ZBIORNIK PODCZAS BUDOWY (JENSEN, 2014) .....	78
RYSUNEK 64 ZDJĘCIE ZBIORNIKA W 2019 (NO GÓRZE) I 2020 ROKU (NA DOLE), WYMIANA POKRYWY (GOOGLE EARTH). .....	79
RYSUNEK 65 KONSTRUKCJA MAGAZYN CIEPŁA TTES W FRIEDRICHSHAFEN (BESPALSKO I IN., 2018) .....	80
RYSUNEK 66 MAGAZYN CIEPŁA TTES W MONACHIUM PODCZAS KONSTRUKCJI ( <a href="https://stadt.muenchen.de/">HTTPS://STADT.MUENCHEN.DE/</a> ).....	82

RYSUNEK 67 KONSTRUKCJA WEWNĘTRZNA MAGAZYNU CIEPŁA TTES W MONACHIUM. (DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR., 2023)).....	83
RYSUNEK 68 MAGAZYN CIEPŁA TTES W MONACHIUM, OBSYPANY I ZINTEGROWANY Z KRAJOBRAZEM (HTTPS://WWW.SAISONALSPEICHER.DE/).....	83
RYSUNEK 69 INTEGRACJA MAGAZYNU CIEPŁA Z SIECIĄ CIEPŁOWNICZĄ (MONACHIUM OSIEDLE ACKERMANNBOGEN (HTTPS://STADT.MUENCHEN.DE/).....	84
RYSUNEK 70 LOKALIZACJA MAGAZYNU CIEPŁA TTES W HANNOVER.....	85
RYSUNEK 71 KONSTRUKCJA MAGAZYNU CIEPŁA TTES W HANNOVER (BESPALCO I IN., 2018).....	85
RYSUNEK 72 MAGAZYN CIEPŁA TTES W HANNOVER, OBSYPANY I WYKORZYSTANY JAKO CZĘŚĆ PLACU ZABAW (HTTPS://SPIELPLATZNET.DE/SPIELPLATZ/260/HANNOVER/KLETTERSPIELPLATZ).....	86
RYSUNEK 73 MONTAŻ TERMOPALI, TERMINAL DOCK MIDFIELD (CFMS I IN., 2017).....	87
RYSUNEK 74 A) PALE ENERGETYCZNE W CENTRUM BIZNESOWYM „THE CIRCLE” NA TERENIE LOTNISKA, B) ROZDZIELACZ INSTALACJI GEOTERMALNEJ (LEED, 2022).....	88
RYSUNEK 75 RURY ABSORBUJĄCE DO PRZESYŁU ENERGII GEOTERMALNEJ (SCHNEIDER I MOORMANN, 2010).....	89
RYSUNEK 76 UMIEJSCOWIENIE AKTYWOWANYCH TERMICZNIE FRAGMENTÓW TUNELU (BUHMANN I IN., 2016).....	90
RYSUNEK 77 POMIARY TEMPERATURY UKŁADU W RÓŻNYCH TRYBACH DZIAŁANIA (BUHMANN I IN., 2016).....	90
RYSUNEK 78 KONSTRUKCJA CENTRUM SZTUKI WSPÓŁCZESNEJ W BREGENCJI, POSADOWIONEGO NA TERMOPALACH, KORZYSTAJĄCEGO Z TECHNOLOGII ENERGETYCZNYCH ŚCIAN SZCELINOWYCH (BRANDL, 2006).....	91
RYSUNEK 79 ZBROJENIE PALI W FORMIE DWU-TEOWNIKA WRAZ Z UMIESZCZONĄ U-RURKĄ WYMIENNIKA CIEPŁA Z ZACHOWANIEM MINIMALNEGO PROMIENIA GIĘCIA RUR PE-XA (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH) ....	94
RYSUNEK 80 RURKI WYMIENNIKA CIEPŁA ZAMONTOWANE W TERMOPALACH (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	94
RYSUNEK 81 WIDOK GOTOWEGO TERMOPALA Z PODWÓJNĄ U-RURKĄ (A) ORAZ JEGO ZBLIŻENIE WYKONANE W TERMOWIZJI Z WYKORZYSTANIEM KAMERY FLIR (B), WIDOCZNY OBRYS PALA I RURKI POLIETYLENOWE O PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	95
RYSUNEK 82 ZWYKŁY PAL (A) I JEGO ZBLIŻENIE (B) Z OGRZEWANYM CIEPŁEM ZIEMI ZBROJENIEM (B) ORAZ ZIMĄ POWIERZCHNIĄ CZOŁOWĄ DWU-TEOWNIKA (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	95
RYSUNEK 83 TEREN REALIZACJI POŚREDNIEGO POSADOWIENIA (Z UWAGI NA NISKĄ NOŚNOŚĆ PODŁOŻA) PRZY ZASTOSOWANIU ZWYKŁYCH PALI I TERMOPALI (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	95
RYSUNEK 84 ŚWIEŻO WYKONANE TERMOPALE (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	96
RYSUNEK 85 WIERTNICA ŚLIMAKOWA DO WYKONYWANIA OTWORÓW DLA PALI NOŚNYCH PODCZAS PRAC NA UL. RAKOWICKIEJ 22E DNIA 10 PAŹDZIERNIKA 2017 R (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	96
RYSUNEK 86 ZESTAW POMIAROWY LABORATORIUM GEOENERGETYKI DOSTARCZONY NA DNO TERENU FUNDAMENTOWANIA Z WYKORZYSTANIEM DŹWIGU, CELEM WYKONANIA TESTU REAKCJI TERMICZNEJ TERMOPALA (LABORATORIUM ENERGETYKI, AGH).....	97
RYSUNEK 87 ETAPY OCENY LOKALIZACJI W POWIĄZANIU Z OGÓLNYM ZAKRESEM BADAŃ LOKALIZACYJNYCH..	128
RYSUNEK 88 SCHEMAT GROMADZENIA DANYCH ARCHIWALNYCH I WYNIKÓW BADAŃ LOKALIZACYJNYCH.....	129
RYSUNEK 89 PRZEGLĄDARKA PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS 4.3, WARSTWY OBIEKTÓW Z NADWYŻKAMI ENERGII, ZASIĘGAMI SIECI CIEPŁOWNICZYCH ORAZ ZAPOTRZEBOWANIEM NA CIEPŁO (HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4/; PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018).....	130
RYSUNEK 90 SZCZEGÓŁY PRZYKŁADOWEGO OBIEKTU Z NADWYŻKĄ ENERGII, ZNAJDUJĄCEGO SIĘ W ZASIĘGU SIECI CIEPŁOWNICZEJ ORAZ OBSZARY Z ZAPOTRZEBOWANIEM NA CIEPŁO (NA PODSTAWIE DANYCH ZE STRONY HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4, PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018).....	131
RYSUNEK 91 MAPA OBIEKTÓW Z NADWYŻKĄ ENERGII CIEPLNEJ (NA PODSTAWIE DANYCH ZE STRONY HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4, PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018).....	132
RYSUNEK 92 BAZA DANYCH PROJEKTU HEATROADMAP EUROPE ORAZ ReUseHeat, DOSTĘPNA NA STRONIE HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4/ (PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018).....	133
RYSUNEK 93 MAPA WYBRANYCH OBIEKTÓW Z NADWYŻKĄ ENERGII CIEPLNEJ (NA PODSTAWIE DANYCH ZE STRONY HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4/; PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018, MAPY POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ, ATLASÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH).....	134
RYSUNEK 94 REGIONALIZACJA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA (MAJER, SOKOŁOWSKA, FRANKOWSKI (RED.) I IN., 2018).....	136

RYSUNEK 95 MAPA OBIEKTÓW Z NADWYŻKĄ ENERGII CIEPLNEJ WSKAZANYCH DO OCENY PRZYDATNOŚCI DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA (NA PODSTAWIE DANYCH ZE STRONY <a href="https://heatroadmap.eu/peta4/">HTTPS://HEATROADMAP.EU/PETA4/</a> , PAN-EUROPEAN THERMAL ATLAS, 2018, MAPY POTENCJAŁU GEOTERMII NISKOTEMPERATUROWEJ, ATLASÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH).....	137
RYSUNEK 96 DOBÓR BUFORU DO OCENY TERENU.....	138
RYSUNEK 97 PRZYKŁADOWE MAPY SPADKÓW POWIERZCHNI TERENU .....	140
RYSUNEK 98 KLASY CORINE W PODZIALE NA OCENY W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU MAGAZYNU CIEPŁA .....	141
RYSUNEK 99 SCHEMAT PRZYGOTOWANIA SYNTETYCZNYCH PROFILI LITOLOGICZNYCH NA PODSTAWIE DANYCH ARCHIWALNYCH.....	141
RYSUNEK 100 SCHEMAT WARIANTÓW GŁĘBOKOŚCIOWYCH SYNTETYCZNYCH PROFILI LITOLOGICZNYCH .....	142

## 12. Spis tabel

TABELA 1 CHARAKTERYSTYKA CECH RÓŻNYCH RODZAJÓW PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA .....	38
TABELA 2 PARAMETRY BTES W EMMABODZIE W SZWECJI.....	41
TABELA 3 PARAMETRY BTES W PASKOVIE W CZECHACH .....	44
TABELA 4 PARAMETRY BTES W BRÆDSTRUP W DANII.....	47
TABELA 5 PARAMETRY BTES W CIEPŁOWNI PRZYSZŁOŚCI W LIDZBARKU WARMIŃSKI .....	52
TABELA 6 PARAMETRY PTES W CIEPŁOWNI PRZYSZŁOŚCI W LIDZBARKU WARMIŃSKIM, POLSKA .....	54
TABELA 7 PARAMETRY BTES W SULEJÓWKU, POLSKA.....	58
TABELA 8 PARAMETRY BTES W ZWOLENIU, POLSKA .....	62
TABELA 9 LISTA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA NA POLU A W KRAKOWIE W OTWORACH O ŚREDNICY 143 MM .....	64
TABELA 10 PARAMETRY BTES W KRAKOWIE (AGH), POLE A, POLSKA .....	64
TABELA 11 LISTA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA NA POLU B W KRAKOWIE.....	65
TABELA 12 PARAMETRY BTES W KRAKOWIE (AGH), POLE B, POLSKA .....	66
TABELA 13 LISTA OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA NA POLU C W MŁOSZOWEJ.....	67
TABELA 14 PARAMETRY BTES W MŁOSZOWEJ (AGH), POLE C, POLSKA .....	68
TABELA 15 PARAMETRY PTES W DRONNINGLUNG W DANII.....	73
TABELA 16 PARAMETRY PTES W EGGENSTEIN-LEOPOLDSHAFEN, NIEMCY.....	75
TABELA 17 PARAMETRY PTES W MARSTAL W DANII .....	77
TABELA 18 PARAMETRY TTES W FRIEDRICHSCHAFEN, W NIEMCZECH.....	80
TABELA 19 PARAMETRY TTES W MONACHIUM, W NIEMCZECH .....	81
TABELA 20 PARAMETRY TTES W KONSBERG, W NIEMCZECH.....	84
TABELA 21 PARAMETRY EF(TG) W ZÜRICHU W SZWAJCARII .....	87
TABELA 22 PARAMETRY EF(TG) W STUTTGART-FASANENHOF W NIEMCZECH.....	88
TABELA 23 PARAMETRY EF(TG) W BREGENCJI W AUSTRII.....	92
TABELA 24 PARAMETRY TERMOPALI W NOWEJ SIEDZIBIE ARCHIWUM NARODOWEGO W KRAKOWIE .....	93
TABELA 25 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIÓW ADMINISTRACYJNO-PRAWNYCH .....	104
TABELA 26 KRYTERIA ŚRODOWISKOWE DO OCENY LOKALIZACJI.....	106
TABELA 27 KRYTERIA SPOŁECZNE DO OCENY LOKALIZACJI .....	107
TABELA 28 KRYTERIA POLITYCZNE DO OCENY LOKALIZACJI .....	107
TABELA 29 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM SPADKÓW POWIERZCHNI TERENU .....	109
TABELA 30 PODZIAŁ I PRZYDATNOŚĆ FORM GEOMORFOLOGICZNYCH DO LOKALIZOWANIA MAGAZYNÓW TYPU BTES I EF(TG).....	110
TABELA 31 PODZIAŁ I PRZYDATNOŚĆ FORM GEOMORFOLOGICZNYCH DO LOKALIZOWANIA MAGAZYNÓW TYPU PTES I TTES .....	111
TABELA 32 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM GEOMORFOLOGICZNEGO.....	111

TABELA 33 RODZAJE NIEKORZYSTNYCH ZJAWISK I PROCESÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH (MAJER, SOKOŁOWSKA, MAJER (RED.) I IN. 2023, ZMIENIONE) .....	112
TABELA 34 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM WYSTĘPOWANIA LUB MOŻLIWOŚCI WYSTĄPIENIA NIEKORZYSTNYCH ZJAWISK I PROCESÓW GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH.....	113
TABELA 35 OCENA LOKALIZACJI NA PODSTAWIE KRYTERIUM DOSTĘPNOŚĆ ZŁOŻ KOPALIN, KTÓRE MOGĄ BYĆ WYKORZYSTANE DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA.....	114
TABELA 36 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM SEZONOWYCH ZMIAN POŁOŻENIA ZWIERCADŁA WÓD PODZIEMNYCH .....	115
TABELA 37 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM JEDNORODNOŚCI OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO.....	116
TABELA 38 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM ZWIERCALNOŚCI GRUNTÓW I SKAŁ DLA BTES, EF(TG) .....	117
TABELA 39 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM URABIALNOŚĆ GRUNTÓW I SKAŁ DLA PTES/TTES.....	119
TABELA 40 KLASYFIKACJA GRUNTÓW I SKAŁ WEDŁUG WŁAŚCIWOŚCI FILTRACYJNYCH ORAZ RYZYKO WYSOKIEJ PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH .....	120
TABELA 41 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM PROCENTOWEGO UDZIAŁU UTWORÓW, W KTÓRYCH NIE WYSTĘPUJE RYZYKO WYSOKIEJ PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU WÓD PODZIEMNYCH	121
TABELA 42 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM PRZEWODNOŚĆ TERMICZNA OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO DLA MAGAZYNÓW BEZZBIORNIKOWYCH TYPU BTES I EF (TG) .....	122
TABELA 43 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM PRZEWODNOŚĆ TERMICZNA OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO DLA MAGAZYNÓW ZBIORNIKOWYCH TYPU PTES/TTES .....	122
TABELA 44 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM ŚREDNIEJ WAŻONEJ OBJĘTOŚCIOWEJ POJEMNOŚCI CIEPLNEJ OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO BTES I EF (TG).....	122
TABELA 45 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM ŚREDNIEJ WAŻONEJ OBJĘTOŚCIOWEJ POJEMNOŚCI CIEPLNEJ OŚRODKA GRUNTOWO-SKALNEGO PTES, TTES .....	123
TABELA 46 GRUPY PRZYDATNOŚCI PODŁOŻA DO BUDOWY PODZIEMNYCH MAGAZYNÓW CIEPŁA (MAJER, SOKOŁOWSKA (RED.) I IN. 2021) .....	123
TABELA 47 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM PRZYDATNOŚCI PODŁOŻA DO POSADOWIENIA MAGAZYNU ZBIORNIKOWEGO .....	124
TABELA 48 GRUPY PRZYDATNOŚCI GRUNTÓW/SKAŁ Z WYKOPÓW DO WBUDOWANIA W NASYP (MAJER, SOKOŁOWSKA (RED.) I IN. 2021) .....	125
TABELA 49 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM PRZYDATNOŚCI GRUNTÓW/SKAŁ Z WYKOPÓW DO WBUDOWANIA W NASYP .....	125
TABELA 50 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM GŁĘBOKOŚCI DO PIERWSZEGO NAWIERCONEGO ZWIERCADŁA WÓD PODZIEMNYCH WZGLĘDEM MAGAZYNU (PTES I TTES).....	126
TABELA 51 OCENA LOKALIZACJI MAGAZYNU CIEPŁA NA PODSTAWIE KRYTERIUM STOPNIA ROZPOZNANIA TERENU .....	127
TABELA 52 GŁĘBOKOŚĆ OPRACOWANIA SYNTETYCZNEGO PROFILU LITOLOGICZNEGO W ZALEŻNOŚCI OD TECHNOLOGII .....	141
TABELA 53 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB UPROSZCZONY (TECHNOLOGIA BTES).....	161
TABELA 54 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB UPROSZCZONY (TECHNOLOGIA EF(TG)).....	162
TABELA 55 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB UPROSZCZONY (TECHNOLOGIA PTES/TTES).....	162
TABELA 56 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB ZAAWANSOWANY (TECHNOLOGIA BTES).....	164
TABELA 57 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB ZAAWANSOWANY (TECHNOLOGIA EF(TG)).....	164
TABELA 58 SPOSÓB PRZYGOTOWANIA PRZYKŁADOWEGO RANKINGU W SPOSÓB ZAAWANSOWANY (TECHNOLOGIA PTES/TTES).....	165