

Zagrożenia i utrudnienia tworzenia magazynów BTES wynikające z budowy geologicznej

Threats and difficulties in creating BTES storage facilities resulting from the geological structure

Agnieszka Moska, Mariusz Miziołek, Bogdan Filar, Tadeusz Kwilosz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Rosnący udział odnawialnych źródeł energii w systemach energetycznych zwiększa znaczenie technologii magazynowania energii. W przypadku energii cieplnej jednym ze stosowanych rozwiązań jest jej podziemne magazynowanie w formacjach geologicznych (ang. underground thermal energy storage, UTES). Zasada działania takiego magazynowania polega na przekazywaniu energii cieplnej ośrodkowi w czasie nadwyżki energii, a następnie na jej odbieraniu w okresie zwiększonego zapotrzebowania. W artykule scharakteryzowano trzy główne typy podziemnych magazynów energii cieplnej: ATES, CTES i BTES, a następnie przeprowadzono przegląd literatury dotyczącej przykładów magazynowania energii cieplnej w odwiertach (BTES). Określono zagrożenia i utrudnienia związane z tworzeniem magazynów BTES wynikające z budowy geologicznej. Przedstawiono zakres cech i parametrów istotnych w procesie klasyfikacji obiektów do funkcji magazynu ciepła BTES. W procesie typowania struktur geologicznych do funkcji BTES należy uwzględnić szereg cech i parametrów opisujących daną strukturę od strony lokalizacyjnej, geologicznej, hydrogeologicznej oraz parametrycznej. Obszary oceny podzielono na cztery zasadnicze grupy tematyczne: ocenę lokalizacji BTES w odniesieniu do ogólnej budowy geologicznej rejonu badań oraz źródła ciepła; szczegółową analizę i ocenę budowy geologicznej w wybranej lokalizacji BTES, w tym: stratygrafii, tektoniki, budowy strukturalnej oraz litologii; ocenę warunków hydrogeologicznych w poziomie magazynowym oraz w warstwach sąsiadujących; ocenę parametrów petrofizycznych i cieplnych skał poziomu magazynującego oraz poziomów okalających. Poszczególne cechy struktury geologicznej mogą mieć dla BTES znaczenie pozytywne albo negatywne lub – w zależności od wielkości danego elementu – zmienne, a ich waga dla wyboru struktury jest różna. Przedstawiona w artykule analiza wskazuje, że typowanie struktury geologicznej do budowy magazynu BTES wymaga wzięcia pod uwagę szeregu cech i parametrów, które opisują daną strukturę, a wybór lokalizacji magazynu BTES powinien opierać się na ocenie, która minimalizuje ryzyko i maksymalizuje efektywność, przy uwzględnieniu zarówno korzyści, jak i ograniczeń wynikających z warunków geologicznych.

Słowa kluczowe: BTES, podziemne magazyny energii.

ABSTRACT: The increasing share of renewable energy sources in energy systems has highlighted the importance of energy storage technologies. For thermal energy, one of the most widely adopted solutions is Underground Thermal Energy Storage (UTES) in geological formations. Its operating principle involves transferring thermal energy to the medium during periods of energy surplus and then recovering it during periods of increased demand. This article describes three main types of underground thermal energy storage: ATES, CTES, and BTES, and then reviews the literature on examples of borehole thermal energy storage (BTES). The paper identifies the risks and difficulties associated with the development of BTES storage systems arising from the geological structure. A range of features and parameters relevant to the classification of sites for BTES heat storage are presented. The process of selecting geological structures for BTES should take into account a number of features and parameters describing a given structure in terms of locational, geology, hydrogeology, and relevant parameters. These areas of assessment were divided into four main thematic groups: assessment of the BTES location in relation to the general geological structure of the study area and the heat source; detailed analysis and assessment of the geological structure at the selected BTES location, including stratigraphy, tectonics, structural geology, and lithology; assessment of hydrogeological conditions in the storage horizon and adjacent layers; and assessment of the petrophysical and thermal parameters of the rocks in the storage horizon and surrounding horizons. Individual features of the geological structure may have a positive or negative impact on BTES, or, depending on the magnitude of a given element, a variable impact, and their importance in the selection of the structure varies. The analysis presented in this article indicates that selecting a geological structure for the construction of a BTES storage facility requires consideration of a number of features and parameters describing the given structure, and that the selection of a BTES storage location should be based on an assessment that minimizes risk and maximizes efficiency, taking into account both the benefits and constraints resulting from geological conditions.

Keywords: BTES, Underground Thermal Energy Storage.

Autor do korespondencji: A. Moska, e-mail: agnieszka.moska@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 03.02.2026 r. Zatwierdzono do druku: 13.08.2026 r.

Wstęp

Magazyny ciepła są niezbędnym elementem sprawnego systemu ciepłowniczego z dużym udziałem energii odnawialnych, ponieważ skutecznie rozwiązują problem niestabilnych dostaw tego rodzaju energii poprzez magazynowanie jej nadwyżki w okresach niskiego zapotrzebowania i późniejszego jej odbierania.

Najprostszym sposobem magazynowania energii jest korzystanie z pojemności cieplnej różnych typów materiałów. Długoterminowe przechowywanie energii cieplnej może zachodzić w górotworze, na różnych głębokościach. Mało efektywną i rzadko stosowaną metodą magazynowania jest korzystanie z płytko usytuowanych poziomych gruntowych wymienników ciepła. Magazynowanie na większych głębokościach jest znacznie bardziej wydajne (Gonet i in., 2012). Wśród takich podziemnych magazynów energii (ang. *underground thermal energy storage*, UTES) wyróżniamy:

- ATES, czyli magazyny w warstwach wodonośnych (ang. *aquifer thermal energy storage*);
- BTES, czyli magazyny wytworzone w górotworze za pomocą otworowych wymienników ciepła (ang. *borehole thermal energy storage*), oraz
- CTES, czyli magazyny kawernowe (ang. *cavern thermal energy storage*).

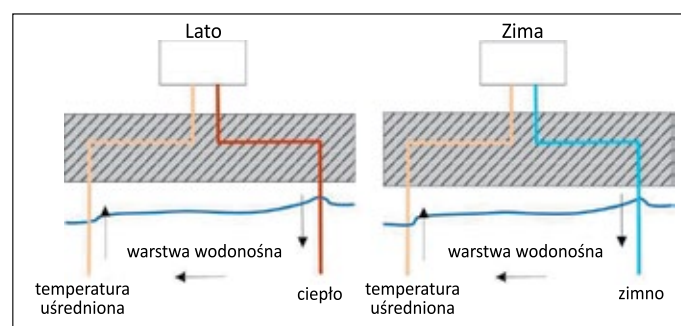
W artykule przedstawiono zagrożenia i utrudnienia związane z konstruowaniem magazynów typu BTES, które wynikają z budowy geologicznej wybranej do tego celu lokalizacji. W procesie typowania struktur geologicznych do pełnienia funkcji otworowego magazynu ciepła należy uwzględnić szereg cech i parametrów opisujących daną strukturę od strony lokalizacyjnej, geologicznej, hydrogeologicznej oraz parametrycznej. Waga tych elementów w szacowaniu przydatności danej struktury będzie różna, jednakże w ocenie należy uwzględnić je wszystkie.

Metody i charakterystyka magazynowania energii cieplnej w strukturach geologicznych

ATES

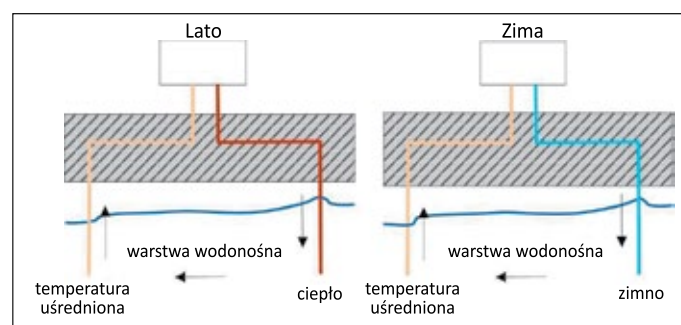
Magazynowanie energii cieplnej w warstwach wodonośnych, czyli ATES, umożliwia gromadzenie energii cieplnej pochodzącej z różnych źródeł w warstwach wodonośnych. Wody podziemne stanowią w tym przypadku nośnik tej energii, a sama energia magazynowana jest zarówno w wodzie podziemnej, jak i w szkieletie skalnym warstwy wodonośnej. System ATES składa się z co najmniej jednej pary otworów, tzw. dubletu, udostępniającego wybrany poziom wodonośny. Istnieją dwa tryby pracy tego typu magazynu: ciągły i cykliczny.

W układzie ciągłym (rysunek 1) każdy odwiert pełni podwójną funkcję: w zależności od etapu pracy może służyć zarówno do odbioru wody, jak i do jej zatłaczania. Oznacza to, że w ramach dubletu każdy z odwiertów może być wykorzystywany zarówno do pozyskiwania, jak i do magazynowania energii. W sezonie letnim z warstwy wodonośnej pobiera się zimną wodę, która służy do chłodzenia klimatyzowanego budynku, równocześnie się ogrzewając, a następnie jest wtłaczana z powrotem do formacji wodonośnej drugim odwiertem. W sezonie zimowym następuje odwrócenie obiegu i ciepła woda wyeksploatowana z warstwy wodonośnej służy do ogrzania budynku, a następnie, ochłodzona, wraca do poziomu wodonośnego. Stąd też w tego rodzaju systemie istnieje wymóg takiego zaprojektowania odwiertów, aby każdy z nich mógł zarówno produkować, jak i przyjmować wodę (Socaciu, 2011; Gonet i in., 2012).



Rysunek 1. Ciągły układ pracy ATES (na podstawie Socaciu, 2011)

Figure 1. ATES continuous operation system (based on Socaciu, 2011)



Rysunek 2. Cykliczny układ pracy ATES (na podstawie Socaciu, 2011)

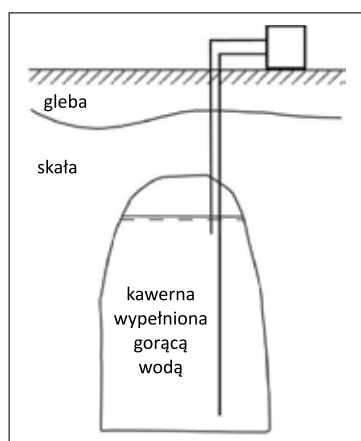
Figure 2. ATES cyclic work system (based on Socaciu, 2011)

W trybie cyklicznym (rysunek 2) każdy z otworów odwierconych w strukturze pełni określoną rolę: jest odwiertem odbierającym albo chłonnym. Zazwyczaj latem do odwiertu jest zatłaczana ciepła woda, a zimą – zimna. System ten jest zatem bardzo podobny w działaniu do pompy ciepła (Socaciu, 2011).

CTES

Inną opcją podziemnego magazynowania energii cieplnej jest wykorzystanie kawern skalnych, czyli CTES (rysunek 3).

Można je wytworzyć z miejscach, w których warunki wodne i/lub gruntowe są niekorzystne. W tego typu magazynach energia jest przechowywana w postaci gorącej wody w wydrążonych kawernach. W takim systemie z dużą objętością wody niezwykle ważne jest utrzymanie warstwowego profilu temperatury, czyli unikanie mieszania się wody. Gorąca woda jest zatłaczana na górę zbiornika, a w tym czasie zimniejsza woda jest wydobywana z dołu zbiornika. Dwa takie systemy zostały zbudowane w Szwecji: w mieście Avesta – o pojemności 15 000 m³ i w Lyckebo – o pojemności 150 000 m³. Na świecie istnieje jeszcze kilka magazynów CTES, ale kawerny nie zostały w tych przypadkach wytworzone specjalnie do celów magazynowania. Są to zamknięte kopalnie i podziemne magazyny przekształcone do magazynowania gorącej wody. Kawerny skalne charakteryzują się dużą wydajnością, lecz niestety są bardzo drogie w budowie (Paksoy i Beyhan, 2015).



Rysunek 3. Schemat CTES (na podstawie: Nordell, 2000)

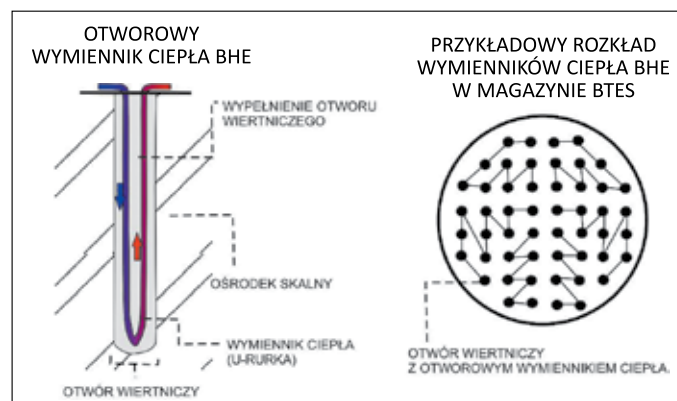
Figure 3. Schematic diagram of the CTES (based on Nordell, 2000)

BTES

Otworowe termalne magazyny energii cieplnej (BTES) są jedną z najczęściej stosowanych na całym świecie metod sezonowego magazynowania energii cieplnej. Magazynując energię cieplną w odwiercie, wykorzystuje się naturalną pojemność cieplną dużej objętości podziemnych skał. Idea tego rozwiązania polega na przekazywaniu energii cieplnej czynnika roboczego, np. ciepłej wody lub solanki krążącej w zamkniętym obiegu U-rurek, do skały macierzystej, a następnie na jej odzyskiwaniu za pośrednictwem tych samych odwiertów w okresach zwiększonego zapotrzebowania na ciepło, przede wszystkim zimą, w sezonie grzewczym. Odwierty wykonuje się do głębokości od kilkudziesięciu metrów do kilkuset metrów, w zależności od warunków gruntowych i składu skały (Cruikshank i Baldwin, 2022). System składa się najczęściej z od kilkudziesięciu do nawet kilkuset otworów o głębokości od kilkudziesięciu metrów do 200–300 m, usytuowanych w odstępach od 2 m do 6 m jeden od drugiego. Najbardziej

efektywnym rozstawieniem otworów jest forma cylindryczna. Stosuje się również ustawienia w formie kwadratu i prostokąta, jednak ustawienie otworów na planie koła zapewnia zminimalizowanie strat ciepła, które w innych konfiguracjach są większe.

W obrębie magazynu otwory łączone są w szeregi od dwóch do kilku odwiertów. Zatłaczanie ciepłej wody lub płynu roboczego rozpoczyna się od otworu położonego najbliżej środka instalacji, a następnie przechodzi się przez kolejne otwory szeregu do części zewnętrznej. Odbieranie energii prowadzone jest z kolei w kierunku odwrotnym, czyli pobieranie ciepła odbywa się od otworu zewnętrznego w szeregu i kończy się w otworze położonym w centrum BTES. Taki system zatłaczania i odbioru energii sprawia, że maksymalne temperatury występują w środkowej części magazynu, a na zewnątrz od niego maleją. Jest to korzystne dla magazynu, ponieważ ogranicza straty zmagazynowanego ciepła (rysunek 4).



Rysunek 4. Schemat konstrukcji otworowego magazynu ciepła

Figure 4. Schematic diagram of the borehole heat storage structure

Przykłady wielkoskalowych magazynów BTES na świecie

Sezonowe systemy BTES są z powodzeniem wykorzystywane jako elementy dużych systemów ciepłowniczych oraz jako wielkoskalowe systemy magazynowania energii cieplnej do zastosowań instytucjonalnych oraz komercyjnych. Wielkoskalowe BTES mogą być użytkowane z pompą ciepła lub jako samodzielne systemy magazynowania energii cieplnej. Rozmiar BTES może być znacznie zróżnicowany w zależności od warunków gruntowych, parametrów ośrodka skalnego oraz potrzeb, czyli ilości energii wymaganej do zmagazynowania (Cruikshank i Baldwin, 2022).

Otworowe termalne magazyny energii BTES występują w wielu projektach na całym świecie, w szeregu różnych konfiguracji. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie istniejących magazynów BTES na świecie. Liczne podziemne magazyny energii cieplnej typu BTES znajdują się na północy

Europy: w Szwecji, Finlandii, Norwegii i Danii. W Norwegii, w Drammen, magazyn BTES wytworzono w skale granitowej wieku permu. W nadkładzie znajdują się drobne piaski, mułowce i gliny, o miąższości od 1 m do 16 m. Poziom wód gruntowych zmienia się w zależności od roku i od miejsca i zwykle znajduje się na głębokości od 2 m do 8 m. BTES składa się ze 100 odwiertów w układzie pięciopierścieniowym, spośród których 36 odwiertów, o głębokości 55 m, znajdujących się na zewnątrz pierścienia stanowi tzw. barierę termiczną dla magazynu. Głębokość pozostałych odwiertów wynosi 50 m. Odwierty stanowiące wspomnianą barierę termiczną magazynu są ładowane ciepłem o niskiej temperaturze, aby zmniejszyć straty ciepła z wnętrza magazynu do górotworu. Za największe straty ciepła zmagazynowanego w górotworze, wynoszące prawie połowę całej zatłoczonej energii cieplnej, odpowiada jego przewodzenie do otaczającej go skały. Również straty adwekcyjne, tzn. mające związek z przepływem wody grunтовой, okazały się znaczące (ok. 10%). Pierwsze naładowanie magazynu odbyło się latem 2020 roku, a kolejne również w lecie w latach 2021 i 2022. Pierwsza eksploatacja była prowadzona zimą 2021/2022 roku, a następna na przełomie lat 2022 i 2023. W ciągu tych dwóch lat udało się odzyskać tylko 30% zatłoczonej energii cieplnej. Magazyn BTES jest jednak nadal w fazie ładowania, oczekuje się więc, że procent odzyskiwanej energii wzrośnie. Magazyn służy do ogrzewania i ochładzania budynku szkoły podstawowej, której system może przyjmować ciepło o temperaturze minimalnej 23–28°C. Ponieważ BTES pracuje na temperaturze do 45°C, może on pokryć zapotrzebowanie szkoły na ciepło bez użycia pompy ciepła. W analizowanym systemie pompa ciepła pełni przede wszystkim funkcję elementu grzewczego wspomagającego proces ładowania magazynu (Kvalsvik i in., 2025).

Magazyn BTES w duńskim mieście Braedstrup składa się z 48 odwiertów o głębokości 45 m w układzie sześciokątnym. Odległość pomiędzy poszczególnymi odwiertami wynosi 3 m. Instalacja obejmuje również pięć odwiertów o głębokości 59 m, do monitorowania temperatury. Miejsce wiercenia zbudowane jest głównie z osadów polodowcowych, gliniasto-mułowcowych, przewarstwionych miejscami drobnym piaskiem i żwirami. Poziom wód gruntowych zaobserwowano na głębokości 69 m w studni położonej w odległości 20 m od BTES (Tordrup i in., 2017). Wydajność i działanie magazynu przez dotychczasową eksploatację były zgodne z oczekiwaniami. Sprawność magazynu w latach 2014–2016 wyniosła 63%. W przypadku pełnoskalowego magazynu tego typu sprawność szacuje się na 81,5% (Sørensen i Schmidt, 2018).

Kolejny przykład magazynu BTES znajduje się w mieście Emmaboda w Szwecji. Wybudowano go w celu magazynowania ciepła wytworzonego latem, gdy korzystający z niego zakład ma mniejsze zapotrzebowanie na ciepło, oraz

wykorzystywania zimą, co zarówno ogranicza straty ciepła latem, jak i pozwala zredukować zakupy energii cieplnej zimą. Magazyn ciepła w Emmabodzie składa się ze 140 odwiertów (10×14) rozmieszczonych na planie prostokąta, o rozstawie 4 m i głębokości 150 m, odwierconych w masywie granodiorytowym. Magazynowane ciepło pochodziło z kilku źródeł, jednak głównie z dwóch pieców hutniczych i powietrza z instalacji wentylacyjnej odlewni. Projekt zakładał, że temperatura zatłaczanej wody będzie wynosiła 60°C, a rocznie uda się zatłoczyć 3600 MWh energii cieplnej oraz odebrać 2500 MWh. Szacowano, że 1100 MWh, czyli 30%, nie uda się odzyskać. Wydajność magazynu BTES w Szwecji miała zatem oscylować na poziomie 70%. Ostatecznie nie udało się uzyskać zaplanowanych parametrów, głównie ze względu na początkowe problemy z obecnością gazu w instalacji, co uniemożliwiło cyrkulację wody, oraz na niższe niż zakładano nadwyżki ciepła z zakładu produkcyjnego. Z tego powodu temperatura zatłaczanego ciepła zamiast szacowanych 60°C wynosiła ok. 40–50°C. Tym samym przez siedem lat funkcjonowania magazynu BTES zatłoczono do ośrodka skalnego 15 700 MWh, a odebrano 870 MWh. Efekty działania magazynu pokazują, jak istotne jest dokładne oszacowanie energii cieplnej, którą można zmagazynować (Nilsson i Rohdin, 2019).

Kolejnym ośrodkiem, w którym z powodzeniem stosuje się instalacje BTES, jest miasto Okotoks w Kanadzie. Wykorzystuje ono energię słoneczną do zasilania sieci ciepłowniczej, z której korzystają 54 domy. BTES składa się ze 144 odwiertów o głębokości 35 m. Rozmieszczone są one w 24 rzędach po 6 odwiertów. Woda jest najpierw tłoczona do środka układu, skąd przepływa do zewnętrznych otworów. Podczas eksploatacji magazynu woda płynie od krawędzi do środka, dzięki czemu najwyższe temperatury są zawsze w środku magazynu. System został uruchomiony w 2007 roku – i o ile w pierwszym cyklu wydajność wyniosła jedynie 6%, to trzy lata później udało się odzyskać aż 54% zatłoczonej energii cieplnej (Sibbitt i in., 2012).

Podziemny magazyn ciepła typu BTES znajduje się również w miejscowości Paskov w Czechach. Został utworzony w osadach aluwialnych, w których skład wchodzi żwir z domieszką ilów lub piaskowców u podstawy. Składa się z 16 odwiertów w konfiguracji 4×4 , o głębokości 60 m. Odległości pomiędzy poszczególnymi odwiertami BHE wynoszą 2,5 m. Obiekt jest wyposażony również w pięć odwiertów monitorujących, w których zainstalowane zostały czujniki termiczne na różnych głębokościach. Maksymalna temperatura w otworach, jaką udało się osiągnąć po roku zatłaczania ciepłą wodą, zmieniła się w przedziale od 69°C do 78,5°C. Przewidywana wydajność instalacji wynosi 65% (Rapantova i in., 2016).

W Neckarsulm w Niemczech technologia BTES została zastosowana do ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania wody

Tabela 1. Istniejące magazyny BTES na świecie**Table 1.** Review of existing BTES projects

Kraj	Nazwa elektrowni / lokalizacja	Rok powstania	Źródła energii*	Pojemność magazynu [m ³]	Liczba odwiertów	Głęb. wiercenia [m]	Temp. magazyn. [°C]	Literatura
Szwecja	Kungsbacka	1980	SC+EHP	85 000	612	35	15–30	Olsson, 1984
Szwecja	Sunstore	1981	SC+EB	–	42	23	10–40	Platell i in., 1984
Szwajcaria	Mont de Pitié	1981	SC+GDHP	–	400	6–8	7–25	Matthey i Pilonel, 1985
Szwecja	Södertuna	1982	SC+UN	105 000	–	–	–	Lundh i Dalenback, 2008
Finlandia	Kerava Solar Village	1983	SC+ EHP+EB	5 400	54	25	40–50	Peltola i in., 1985
Szwecja	Luleå	1983	WH+HP	120 000	120	65	–	Nordell, 1994
Szwecja	Kullavik	1983	SC+ OB+EHP	8 100	286	12	10–50	Olsson, 1984
Holandia	Groningen	1984	SC+UN	23 000	–	–	–	Wijsman i Havinga, 1986
Szwecja	Grosvad	1985	SC+EHP	–	126	110	10–35	Gehlin, 2016
Włochy	Treviglio	1985	SC+UN	43 000	414	11	–	Gehlin, 2016
Francja	Cormontreuil	1986	–	–	24	25	30–60	Baudoin, 1988
Szwecja	Söderköping	1987	SC+EHP	–	382	18	10–31	Gehlin, 2016
Szwecja	Meyrin	1988	SC+EHP	–	258	15	10–32	Matthey, 1988
Niemcy	Neckarsulm	1999	SC+ EHP+GB	63 360	528	30	65	Reuss, 2015
Szwecja	Lidköping	–	SC+UN	15 000	–	–	–	Fisch i in., 1998
Szwecja	Anneberg	2002	SC+EB	60 000	100	65	20–60	Dalenback i in., 2000
Niemcy	Attenkirchen	2002	SC+EHP	9 350	90	30	–	Reuss i in., 2006
Niemcy	Crailsheim	2007	SC+EHP	37 500	80	55	–	Bauer i in., 2010
Kanada	DLSC (Okotoks)	2007	SC+GB	33 657	144	35	–	Sibbit i in., 2012
Szwecja	Emmaboda	2010	WH+HP	280 800	140	150	15–45	Nordell i in., 2015
Dania	Braedstrup	2012	SC+ CCHP+ EHP+EB	19 000	48	45	12–50	Tordrup i in., 2017 Sørensen i Schmidt, 2018
Czechy	Paskov	2012	CCHP	–	16	60	69–79	Rapantova i in., 2016
Szwajcaria	Dübendorf	2012	GB+HP	–	144	100	40–50	Baldini i Weber, 2018 Florentini i Baldini, 2021
Norwegia	Drammen	2020	SC+HP	–	100	50–55	30–45	Kvalsvik i in., 2025
Polska	Lidzbark Warmiński	2022	PVT+AHX	640 000	300	99,9	5–15	Żeruń i in., 2024

* OA – powietrze zewnętrzne; HP – pompa ciepła; SC – kolektor solarny; EB – kocioł elektryczny; GDHP – pompa ciepła napędzana gazem; EHP – pompa ciepła napędzana energią elektryczną; WH – ciepło odpadowe; GB – kocioł gazowy; OB – kocioł olejowy; CCHP – skojarzone chłodzenie, ogrzewanie i zasilanie; PVT – kolektor fotowoltaiczno-termiczny; AHX – powietrzny wymiennik ciepła; UN – nieznan

* OA – outdoor air; HP – heat pump; SC – solar collector; EB – electric boiler; GDHP – gas-driven heat pump; EHP – electrically driven heat pump; WH – waste heat; GB – gas boiler; OB – oil boiler; CCHP – combined cooling, heating and power; PVT – photovoltaic-thermal collector; AHX – air heat exchanger; UN – unknown.

użytkowej w 700 mieszkaniach. Jest tam zainstalowanych ok. 5000 m² kolektorów słonecznych, które używane są do bezpośredniego ogrzewania miejskiego lub też do sezonowego magazynowania. Magazyn BTES składa się z 528 odwiertów wiertniczych. Z uwagi na lokalną formację geologiczną, w której wysoce przepuszczalna warstwa dolomitu z przepływem wód gruntowych zaznacza się poniżej 30–35 m, otwory zostały

odwiercone do głębokości 30 m w warstwie gliny (Akhmetov i in., 2016; Borko i in., 2025). Około 50% całkowitej dostawy ciepła pochodzącego z energii słonecznej, tj. 1667 MWh, wykorzystano do ładowania magazynu BTES. W czasie rozładowania odzyskano 187 MWh, a reszta zapotrzebowania na ciepło została pokryta bezpośrednio przez kolektory słoneczne i kotły gazowe (Borko i in., 2025).

Klasyfikacja cech budowy geologicznej z punktu widzenia budowy magazynu BTES

Jak już wspomniano, w procesie typowania struktur geologicznych do funkcji BTES należy uwzględnić szereg cech i parametrów opisujących daną strukturę od strony lokalizacyjnej, geologicznej, hydrogeologicznej oraz parametrycznej. Waga tych elementów w szacowaniu przydatności danej struktury będzie różna, natomiast wszystkie muszą zostać uwzględnione. Poniżej przedstawiono zakres cech i parametrów, które są istotne w procesie klasyfikacji obiektów do pełnienia funkcji magazynu ciepła BTES. Obszary oceny podzielono na cztery zasadnicze grupy tematyczne:

1. Ocena lokalizacji BTES w odniesieniu do ogólnej budowy geologicznej rejonu badań oraz źródła ciepła.
2. Szczegółowa analiza i ocena budowy geologicznej w wybranej lokalizacji BTES, w tym: stratygrafii, tektoniki, budowy strukturalnej oraz litologii.
3. Ocena warunków hydrogeologicznych w poziomie magazynowym oraz warstwach sąsiadujących, która powinna obejmować:
 - nasycenie wodą i charakterystykę poziomu wodonośnego;
 - typ i cechy zwierciadła wód gruntowych i podziemnych;
 - nachylenie zwierciadła wód gruntowych oraz poziomu wodonośnego;
 - przewodność hydrauliczną.
4. Ocena parametrów petrofizycznych i cieplnych skał poziomu magazynującego oraz poziomów okalających, w tym:
 - porowatości;
 - przepuszczalności i współczynnika filtracji;
 - temperatury ośrodka skalnego;
 - przewodności cieplnej;
 - pojemności cieplnej.

Przedstawione cechy mogą mieć dla BTES znaczenie pozytywne albo negatywne lub – w zależności od wielkości danego elementu – zmienne, a ich waga dla wyboru struktury jest różna, dlatego w dalszej części publikacji przedstawiono krótki opis poszczególnych cech w rozbiciu na pozytywne oraz negatywne cechy.

Cechy i własności pozytywne dla budowy BTES

Cechy lokalizacyjne

Warunki topograficzne, kształt działki i odległość od źródła ciepła:

- optymalnym terenem jest działka płaska, o jednolitej morfologii, nienachylona;
- dostępna wielkość działki nie powinna ograniczać wielkości magazynu;

- kształt działki nie powinien mieć wpływu na układ przestrzenny magazynu;
- odległość działki od źródła ciepła powinna być minimalna, najlepiej aby znajdowała się bezpośrednio przy ciepłowni. Krótkie odległości przesyłu, rzędu kilkuset metrów, pozwalają ograniczyć wpływ strat dystrybucyjnych, jednak ich rzeczywista wartość zależy od parametrów technicznych instalacji.

Cechy budowy geologicznej

1. Stratygrafia – ta cecha ma przede wszystkim znaczenie informacyjne.
2. Tektonika:
 - brak uskoku i fałdów;
 - brak spękań, szczelin, struktur krasowych typu: leje krasowe, korytarze, jaskinie, itp.;
 - poziome lub niewielkie nachylenie warstw poziomu magazynowego;
 - zachowana ciągłość poziomu magazynowego w ujęciu zarówno horyzontalnym, jak i pionowym.
3. Miąższość:
 - duża miąższość poziomu magazynowego, jednorodność oraz jego niezmiennosc;
 - miąższość poziomu magazynowego powinna zapewnić odwiercenie otworów o optymalnej głębokości.
4. Litologia i skład mineralny skał poziomu magazynowego:
 - petrografia, skład mineralny skał, ich granulometria i cechy strukturalno-teksturalne odgrywają istotną rolę dla magazynowania ciepła w górotworze, dlatego ich rozpoznanie jest bardzo ważne;
 - parametry poszczególnych typów skał decydują o ich pojemności cieplnej. Do skał o dużej pojemności cieplnej należą: piaskowce (700–3300 J/kgK), wapienie (820–1720 J/kgK), granity (670–1550 J/kgK), granodiority (840–1260 J/kgK) (Schön, 2011);
 - przewodnictwo cieplne, czyli m.in. szybkość przepływu ciepła, jest silnie związane z petrografią i składem mineralnym skał. Najwyższe wartości przewodnictwa cieplnego wykazują: piaskowce, kwarcyty, wapienie i granity;
 - w przypadku skał osadowych najlepsze będą skały jednorodne pozbawione warstwowania, o dużej miąższości ławic, nieprzekładane wcale lub minimalnie skałami o innych parametrach strukturalno-teksturalnych;
 - w przypadku skał magmowych powinny one być w miarę jednorodne, pozbawione uskoku, dużych stref spękań, pustek wypełnionych powietrzem lub gazami;
 - skład granulometryczny skał osadowych oraz zawartość spoiwa odgrywają istotną rolę dla wielkości parametrów cieplnych skał. Skały osadowe o małej zawartości

spoiwa charakteryzują się podwyższoną porowatością, natomiast duża zawartość cementu powoduje jej obniżenie. W przypadku skał porowatych nasyconych wodą wzrasta ich pojemność cieplna. Nasycenie wodą może również zwiększać przewodność cieplną w porównaniu ze skałami suchymi. W skałach o niskiej porowatości właściwości cieplne zależą głównie od składu mineralnego i struktury skały.

5. Głębokość i charakter stropu poziomego magazynowego: Najkorzystniejszy układ to taki, w którym strop poziomego magazynowego leży płytko pod powierzchnią gruntu, w zakresie 1–3 m, wtedy bardzo łatwo można zabezpieczyć strop magazynu przed ucieczką ciepła, stosując odpowiednie materiały izolacyjne. Głębsze położenie stropu utrudnia lub nawet uniemożliwia jego izolację, co powoduje częściową utratę ciepła.

Cechy warunków hydrogeologicznych

1. Nasycenie wodą poziomego magazynowego: Porównując skały suche i nasycone, należy stwierdzić, że obecność wody w poziomie magazynowym jest korzystna dla skał, ponieważ zwiększa ich pojemność cieplną i przewodność cieplną. Dzieje się tak z tego powodu, że w stanie suchym pory i pustki skalne wypełnia powietrze, które ma znacznie gorsze parametry cieplne niż woda.
2. Pochylenie zwierciadła wód podziemnych: Najkorzystniejszymi warunkami hydrogeologicznymi dla magazynowania ciepła w BTES jest poziome zwierciadło wód podziemnych i brak ich przepływu w poziomie magazynowym. W przypadku istnienia przepływu dochodzi do wynoszenia ciepła poza magazyn i jego bezpowrotna strata.
3. Skład chemiczny wód poziomego magazynowego: Najlepsze parametry cieplne charakteryzują wody słodkie o niskiej mineralizacji.

Parametry petrofizyczne

1. Porowatość – parametr ten dotyczy przede wszystkim skał osadowych, zarówno skonsolidowanych, takich jak piaskowce, zlepieńce, mułowce, iłowce, wapienie, dolomity itp., jak i nieskonsolidowanych, takich jak piaski, żwiry czy gliny. W przypadku skał nasyconych wodą wzrost porowatości powoduje wzrost pojemności cieplnej i przy braku przepływu wód podziemnych jest korzystny dla procesu magazynowania. Spadek porowatości piaskowców, drobnienie ziarna i przechodzenie skały w mułowce i iłowce powoduje spadek pojemności cieplnej tych skał.
2. Przepuszczalność i współczynnik filtracji – parametry te mają istotne znaczenie dla transportu ciepła w ośrodku skalnym. Wyższa przepuszczalność skał nasyconych wodą umożliwia przepływ wód podziemnych, co może

zwiększać efektywny transport ciepła w porównaniu ze skałami suchymi.

3. Przewodność cieplna skał – określa możliwość przewodzenia ciepła przez skały wyrażoną w jednostkach ciepła W/mK. Parametr ten jest bardzo zróżnicowany w odniesieniu zarówno do różnych skał, jak i określonego typu litologicznego. Najwyższe wartości przewodności cieplnej wśród skał mają: piaskowce (0,9–6,5 W/mK), kwarcyty (3,1–7,6 W/m), granity (1,25–4,45 W/mK) (Schön, 2011).
4. Pojemność cieplna – jest to parametr opisujący, ile ciepła trzeba dostarczyć, aby spowodować wzrost temperatury o jeden stopień. Wysoką pojemnością cieplną charakteryzuje się np. woda (4190 J/kgK). Jeśli chodzi o skały, cechują się one znacznie niższą pojemnością cieplną niż woda, np. piaskowce: 750–3330 J/kgK, iłowce: 840–920 J/kgK, wapienie: 820–1720 J/kgK, granity: 670–1550 J/kgK (Schön, 2011). Pojemność cieplną skał może znacząco podnieść woda w skałach porowatych lub zeszczerzlinowanych.
5. Temperatura złoża w strefie przypowierzchniowej zmienia się do głębokości 15–20 m i na tej głębokości osiąga wielkość średniej rocznej temperatury powietrza. Poniżej tej głębokości temperatura zmienia się zgodnie ze stopniem geotermicznym wynoszącym ok. 1°C na 33 m. Zatem przyjmując średnią temperaturę w wysokości 9°C, można się spodziewać, że na głębokości 50 m temperatura będzie wynosić 10°C, na 100 m – 11,4°C, na 150 m – 12,9°C, na 200 m – 14,5°C, na 250 m – 16°C i na 300 m – 17,5°C. Rozkład temperatury wskazuje więc, że dla BTES najlepszym rozwiązaniem byłoby wiercenie głębszych otworów, gdyż to pozwoliłoby uzyskać wyższe temperatury magazynowania i pozyskać część ciepła jako energię geotermalną z górotworu.

Cechy i własności negatywne dla budowy BTES

Cechy lokalizacyjne

1. Topografia. Do elementów, które są niekorzystne w ocenie cech lokalizacyjnych, należą:
 - silne pochylenie terenu oraz jego duże zróżnicowanie morfologiczne;
 - ograniczona powierzchnia pod wiercenia;
 - duże oddalenie działki od źródła ciepła;
 - niekorzystny kształt działki, który wpływa negatywnie na układ przestrzenny magazynu.

Cechy budowy geologicznej

1. Stratygrafia – silnie zróżnicowana stratygrafia w interwale projektowanego BTES.

2. Tektonika – obecność uskoku, ścieżek tektonicznych, nasunięć, stref silnie zaburzonych, osuwisk stwarza niekorzystne warunki dla magazynowania ciepła, otwiera drogi migracji ciepła poza magazyn i różnicuje warunki w strefie magazynowej.
3. Miąższość – niekorzystna dla BTES jest mała miąższość poziomu magazynowego oraz jego duża zmienność litologiczna, strukturalno-teksturalna, zarówno w układzie pionowym, jak i poziomym. Takie cechy poziomu magazynowego mogą mieć niekorzystny wpływ na rozmieszczenie odwiertów, ich głębokość i opróbowanie.
4. Litologia – od strony litologicznej negatywną cechą może być skład mineralogiczny oraz petrograficzny skał. Najniższe wartości przewodności cieplnej mają takie minerały jak illit (1,9 W/mK), kaolinit (2,6 W/mK), gips (1,0–1,3 W/mK), biotyt (0,7–2,02 W/mK). Jeśli chodzi o pojemność cieplną, to najniższe wartości tego parametru mają z kolei chloryt (600 J/kgK), kwarc (700–740 J/kgK), skalenie (610–750 J/kgK), anhydryt (510–620 J/kgK), minerały żelaziste (520–620 J/kgK). W odniesieniu do tych samych parametrów, ale dotyczących skał – w przypadku pojemności cieplnej najniższe wartości wykazują iłowce (920 J/kgK), mułowce (960–1080 J/kgK), glina (840–1000 J/kgK) (Schön, 2011). Parametr litologiczny nie jest decydującym argumentem za lub przeciw budowie BTES w danej lokalizacji, natomiast znajomość parametrów skał magazynowych stanowi podstawową kwestię przy obliczaniu wielkości magazynu, jaką trzeba zaprojektować, aby zmagazynować żądaną ilość ciepła.
5. Głębokość położenia stropu poziomu magazynowego – położenie stropu na głębokości większej niż 2–3 m poniżej poziomu terenu uniemożliwia wykonanie izolacji termicznej stropu poziomu magazynowego, wobec tego nastąpią straty ciepła w wyniku jego migracji w części stropowej magazynu.

Warunki hydrogeologiczne

Biorąc pod uwagę warunki hydrogeologiczne strefy magazynowej i sąsiadujących z nią skał, czynnikami obniżającymi przydatność obiektu są:

- brak nasycenia wodą skał w poziomie magazynowym – gdyż powoduje to obniżenie parametrów cieplnych, zarówno pojemności, jak i przewodnictwa cieplnego skał;
- przepływ wody w poziomie magazynowym – powoduje utratę ciepła, które wraz z wodą wydostaje się poza obszar magazynu, skąd nie będzie mogło już być odzyskane;
- duża mineralizacja wód poziomu magazynowego – obniża przewodnictwo cieplne oraz pojemność cieplną skał, ale nie jest to czynnik eliminujący obiekt rozpatrywany do funkcji BTES.

Parametry petrofizyczne

1. Porowatość – w przypadku skał suchych wzrost porowatości obniża pojemność cieplną i przewodnictwo cieplne skał, odwrotnie niż w przypadku skał nasyconych wodą (Jarzyna i in., 2021).
2. Przepuszczalność i współczynnik filtracji – wysoka wartość obu tych parametrów w przypadku obecnego w złożu przepływu wód podziemnych jest dla magazynu niekorzystna. Im wyższe są oba parametry, tym szybszy i większy objętościowo jest przepływ wody, która transportuje ciepło i unosi je poza magazyn, powodując duże straty ciepła.
3. Pojemność cieplna – mała pojemność cieplna skał powoduje, że dla zmagazynowania określonej ilości ciepła konieczne będzie odwiercenie większej liczby otworów, a co za tym idzie – magazyn powierzchniowo będzie większy lub otwory będą musiały być wiercone głębiej. W jednym i drugim przypadku generuje to większe koszty budowy magazynu.
4. Temperatura złoża – przy płytkim magazynowaniu, do ok. 50 m, temperatura złoża jest zbliżona do średniej temperatury rocznej danego miejsca. W przypadku systemów niskotemperaturowych grunt może jednak pełnić funkcję naturalnego źródła regeneracji cieplnej. Nie jest to ciepło geotermalne związane ze wzrostem temperatury wraz z głębokością, lecz energia cieplna zgromadzona w płytkich warstwach ziemi. Magazynowanie powyżej głębokości 50 m pozwala już w pewnym stopniu pozyskać ciepło geotermalne, gdyż średnio co 33 m temperatura skał wzrasta o 1°C.
5. Szczelinowatość – ta cecha może występować we wszystkich rodzajach skał. Najczęściej szczelinowatość wiąże się z tektoniką, rozkładem naprężeń lokalnych i regionalnych oraz ze zjawiskami krasowymi. Szczeliny związane są ze strefami uskoku i fałdowymi – i wtedy są skoncentrowane w rejonie takiej struktury. W przypadku oddziaływania naprężeń regionalnych tworzą się spękania ciosowe rozłożone dość równomiernie w strefie ich oddziaływania, a zespoły spękań obejmują cały profil litologiczny skał. W przypadku szczelin i kavern krasowych te struktury ograniczają się do skał podatnych na zjawiska krasowe (np. wapienie, dolomity, gipsy, anhydryty), a ich zasięg jest zróżnicowany. Wielkość tych struktur zmienia się od małych do dużych. W przypadku magazynów BTES obecność jakichkolwiek szczelin będzie niekorzystna dla magazynu z tego względu, że w większości przypadków szczeliny nie ograniczają się jedynie do magazynu, ale sięgają daleko poza jego granice. Obecność wody w szczelinach i jej nawet minimalny przepływ będzie powodował odpływ zmagazynowanego ciepła poza magazyn. Ciepło to zostanie bezpowrotnie stracone, dlatego stwierdzenie szczelin w strefie magazynowania

należy uznać za cechę niepożądaną, a nawet eliminującą potencjalny obiekt, o ile zostanie stwierdzony też przepływ w poziomie magazynowym.

Podsumowanie i wnioski

Coraz szersze wykorzystanie w energetyce europejskiej i światowej źródeł odnawialnych wymaga znalezienia optymalnego sposobu na magazynowanie nadmiarowej energii wyprodukowanej przez te instalacje. Najprostszym sposobem magazynowania energii cieplnej jest budowa podziemnych magazynów energii, wśród których znajdują się magazyny wytworzone w górotworze za pomocą otworowych wymienników ciepła, czyli magazyny typu BTES. W niniejszym artykule przedstawiono zagrożenia i utrudnienia związane z wytwarzaniem magazynów BTES wynikające z budowy geologicznej. Z przeprowadzonych analiz można wysnuć następujące wnioski:

- Przedstawione w artykule przykłady wielkoskalowych magazynów BTES wskazują, że tego typu gromadzenie energii jest z powodzeniem wykorzystywane na całym świecie.
- Typując struktury geologiczne do budowy magazynu BTES należy wziąć pod uwagę szereg cech i parametrów, które opisują daną strukturę, zarówno od strony lokalizacyjnej, jak i geologicznej, hydrogeologicznej i parametrycznej.
- Powyższe cechy struktury geologicznej mogą mieć dla BTES znaczenie pozytywne albo negatywne lub – w zależności od wielkości danego elementu – zmienne. Waga poszczególnych elementów jest różna, niemniej wszystkie one muszą zostać uwzględnione.
- Przed przystąpieniem do budowy magazynu typu BTES konieczne jest wstępne rozpoznanie budowy geologicznej w miejscu lokalizacji inwestycji i wykonanie jednego lub dwóch otworów pilotażowych.
- Wybór lokalizacji dla magazynu BTES powinien opierać się na analizie, która minimalizuje ryzyko i maksymalizuje efektywność, uwzględniając zarówno korzyści, jak i ograniczenia wynikające z warunków geologicznych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Ocena budowy geologicznej i jej wpływ na lokalizację otworowego magazynu energii cieplnej BTES (Borehole Thermal Energy Storage)*, nr zlecenia: 39/KP/2025, nr archiwalny: DK-4100/17/2025-02.

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*, 48, Special Issue: 31–40.

- Baldini L., Weber R., 2018. High temperature seasonal BTES for effective load shifting and CO₂ emission reduction. *Eurosun 2018 – 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, Rapperswil, Switzerland, September 10–13, 2018*.
- Baudoin A., 1988. Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie d'échangeurs baïonnette verticaux: modele de predimensionnement. *Reims*.
- Bauer D., Marx R., Nusbicker-Lux J., Ochs F., Heidemann W., Muller-Steinhagen H., 2010. German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Solar Energy*, 84: 612–623. DOI: 10.1016/j.solener.2009.05.013.
- Borko K., Brenčič M., Savšek Z., Knez J., Vozelij A., Kisel G., Rman N., 2025. Insight into Aquifer and Borehole Thermal Energy Storage Systems for Slovenia's Energy Transitions. *Energies*, 18(5): 1019. DOI: 10.3390/en18051019.
- Cruikshank C.A., Baldwin C., 2022. Sensible thermal energy store. [W:] Letcher T.M. (ed.). *Storing Energy with Special Reference to Renewable Energy Sources*. Elsevier.
- Dalenback J.O., Hellstrom G., Lundin S., Nordell B., Dahm J., 2000. Borehole Heat storage for the Anneberg solar heated residential district in Danderyd, Sweden. *Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage Terrastock 2000, Stuttgart, Germany, 28 August – 1 September 2000*: 201–206.
- Fisch M.N., Guigas M., Dalenback J.O., 1998. A review of large-scale solar heating systems in Europe. *Solar Energy*, 63: 355–366. DOI: 10.1016/S0038-092X(98)00103-0.
- Florentini M., Baldini L., 2021. Control-oriented modelling and operational optimization of a borehole thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 199: 117518. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117518.
- Gehlin S., 2016. Borehole Thermal Energy Storage. [W:] Rees S.J. (ed.). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing: 295–327. DOI: 10.1016/B978-0-08-100311-4.00011-X.
- Gonet A., Śliwa T., Hendel J., 2012. Magazynowanie w górotworze ciepła pochodzącego z różnych źródeł. *AGH Drilling Oil Gas*, 29(1): 135–144.
- Jarzyna J.A., Baudzis S., Janowski M., Puskarczyk E., 2021. Geothermal Resources Recognition and Characterization on the Basis of Well Logging and Petrophysical Laboratory Data, Polish Case Studies. *Energies*, 14(4): 850. DOI: 10.3390/en14040850.
- Kvalsvik K.H., Ramstad R.K., Holmberg H., Kocbach J., 2025. Measurements and simulations of high temperature borehole thermal energy store in Drammen, Norway – evaluation of thermal losses and thermal barrier. *Geothermics*, 125, 130192. DOI: 10.1016/j.geothermics.2024.103192.
- Lundh M., Dalenback J.O., 2008. Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: Initial evaluation. *Renew Energy*, 33: 703–711. DOI: 10.1016/J.RENENE.2007.03.024.
- Matthey B., Pilonel B., 1985. Solar assisted gas heat pump with ground coupled storage for twelve family houses. *Second Work. Sol. Assist. Heat Pumps with Gr. Coupled Storage, Proc., Ottawa, Canada: Public Works Canada*.
- Matthey B., 1988. Accumulateur saisonnier de chaleur solaire de 20000 m³ par sondes verticales sous un batiment industriel a Meyrin-Geneve. *Conference Int. sur le Stock. l'énergie pour le Chauffage. le refroidissement*. 4: 561–565.
- Nilsson 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: 1022–1034. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.020.
- Nordell B., 1994. Borehole heat store design optimization. *Lulea tekniska universitet*.

- Nordell B., Andersson O., Rydell L., Scorpo A.L., 2015. Long-term performance of the HTBTES in Emmaboda, Sweden. *Greenstock 2015 Int. Conf. Undergr. Therm. Energy Storage*, 19.05.2015–21.05.2015.
- Nordell B., 2000. Largescale Thermal Energy Storage. *WinterCities'2000, Energy and Environment*, 14.02.2000, Luleå, Szwecja.
- Olsson S., 1984. The Sunclay and Kullavik Projects – Heat Storage in Clay at Low and High Temperature. [W:] Den Ouden C. (ed.). *First E.C. Conf. Sol. Heat. Proc. Int. Conf., Amsterdam, April 30–May 4, 1984, Dordrecht: Springer Netherlands*: 894–898. DOI: 10.1007/978-94-009-6508-9_162.
- Paksoy H.Ö., Beyhan B., 2015. Thermal energy storage (TES) system for greenhouse technology. [W:] Cabeza L.F. (ed.). *Advances in Thermal Energy Storage Systems. Methods and Applications. Woodhead Publishing Series in Energy*, 66: 533–548.
- Peltola S.S., Lund P.D., Routti J.T., 1985. First year operating experience from Kerava solar village. *Int J Ambient Energy*, 6: 117–122.
- Rapantova N., Pospisil P., Koziorek J., Vojcinak P., Grycz D., Rozehnal Z., 2016. Optimisation of experimental operation of the borehole thermal energy storage. *Applied Energy*, 181: 464–476.
- Reuss M., Beuth W., Schmidt M., Schoelkopf W., 2006. Solar district heating with seasonal storage in Attenkirchen. *Proc. IEA Conf. ECOSTOCK, Richard Stock. Coll. Pomona, New Jersey, USA*.
- Reuss M., 2015. The use of borehole thermal energy storage (BTES) systems. [W:] Cabeza L.F. (ed.). *Advances in Thermal Energy Storage Systems. Woodhead Publishing*: 117–147. DOI: 10.1533/9781782420965.1.117.
- Schön J.H., 2011. Physical Properties of Rocks: A Workbook. *Handbook of Petroleum Exploration and Production*, vol. 8. Elsevier, Netherlands. <<https://archive.org/details/j.-h.-schon-physical-properties-of-rocks-a-workbook-handbook-of-petroleum-explor/page/n9/mode/2up>> (dostęp: 9.05.2025).
- Sibbitt B., McClenahan D., Djebbar R., Thornton J., Wong B., Carrire J., Kokko J., 2012. The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system – five years of operation. *Energy Procedia*, 30: 856–865.
- Socaciu L.G., 2011. Seasonal sensible thermal energy storage solution. *Journal of Practices and Technologies*, 10(19): 49–68.
- Sørensen P.A., Schmidt T., 2018. Design and Construction of Large Scale Heat Storages for District Heating in Denmark. *14th International Conference on Energy Storage*, 25–28 April 2018, Adana, Turkey.
- Tordrup K.W., Poulsen S.E., Bjorn H., 2017. An improved method for upscaling borehole thermal energy storage using inverse finite element modelling. *Renew Energy*, 105: 13–21. DOI: 10.1016/j.renene.2016.12.011.
- Wijsman A.J.T.M., Havinga J., 1986. The Groningen project: 96 solar houses with seasonal thermal storage in the soil. *Intersol Eighty Five*: 818–824. DOI: 10.1016/B978-0-08-033177-5.50161-7.
- Żeruń M., Jagoda E., Majer E., Ryżyński G. (red.), Pluta P., Jabłoński J., Wczelik K., Zawłocki J., Wojtaszek P., Ostrowski S., Majer K., Boniewska K., Kobiela J., Kucińska P., Kutyna M., 2024. Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES i TTES, EF). *PIG-PIB, Warszawa*.



Dr Agnieszka MOSKA
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: agnieszka.moska@inig.pl



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny; Kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



Mgr Mariusz MIZIOLEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.mizolek@inig.pl



Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl