

Kryteria oceny przydatności górotworu do magazynowania ciepła za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)

Mateusz Żeruń¹, Ewa Jagoda¹, Edyta Majer¹, Kajetan Wczelik¹, Grzegorz Ryżyński¹



M. Żeruń



E. Jagoda



E. Majer



K. Wczelik



G. Ryżyński

Criteria for assessing the suitability of the subsurface for heat storage using closed systems (BTES, PTES/TTES, EF). Prz. Geol., 73: 666–673; doi: 10.7306/2025.72

Abstract. The criteria and a methodology were developed for evaluating the suitability of locations for the construction of underground thermal energy storage using closed systems: BTES (Borehole Thermal Energy Storage), PTES/TTES (Pit/Tank Thermal Energy Storage), and EF (Energy Foundations). Based on this methodology and the established criteria, 25 locations in Poland were assessed for their potential to store excess heat in the rock mass. A key part of the task involved analysing Poland's existing legal and regulatory framework concerning the implementation of these technologies, and developing recommendations to optimise formal and legal conditions. The results have been made available through the PGI-NRI online platforms.

Keywords: RES, underground thermal energy storage, BTES, PTES, TTES, EF

W obliczu globalnych wyzwań związanych z transformacją energetyczną i koniecznością ograniczenia emisji gazów cieplarnianych coraz większego znaczenia nabierają technologie magazynowania ciepła. Podziemne magazyny ciepła (UTES – *Underground Thermal Energy Storage*) to jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań w zakresie efektywnego zarządzania ciepłem, zarówno w zastosowaniach indywidualnych, jak i systemach ciepłowniczych. Ich wykorzystanie umożliwi lepsze zagospodarowanie nadwyżek ciepła pochodzącego z odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz ciepła odpadowego generowanego przez przemysł i inne procesy technologiczne (Żeruń i in., 2024a).

Wyniki badań unijnych (projekt *Heat Roadmap Europe*) wskazują, że ok. 25–30% energii zużywanej w przemyśle i energetyce jest tracone jako ciepło odpadowe. Potencjał takiego ciepła w całej Unii Europejskiej oceniono na ok. 2860 TWh/rok (~10 300 PJ). Według danych pochodzących z projektu *Heat Roadmap Europe* w Polsce ilość nadwyżek ciepła wynosi ok. 233 PJ. Zagospodarowanie ułamka tej wartości może przynieść znaczącą korzyść ekonomiczną i przyczynić się do poprawy jakości powietrza i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych.

W latach 2023–2024 Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) realizował zadanie państwowej służby geologicznej pn. *Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)*

w wybranych lokalizacjach na terenie Polski. Zadanie zostało przygotowane w nawiązaniu do *Wieloletniego Programu Rozwoju Wykorzystania Zasobów Geotermalnych w Polsce* (2022), opracowanego przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Głównym celem zadania było dostarczenie kompleksowej wiedzy na temat możliwości lokalizowania i wyboru optymalnej technologii podziemnego magazynowania ciepła w systemach zamkniętych BTES, PTES/TTES i EF/TG.

Ze względu na innowacyjny i pilotażowy charakter projektu przeprowadzono konsultacje ze środowiskiem naukowym oraz biznesowym i podjęto współpracę z Wydziałem Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Wydziałem Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie, Instytutem Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz firmą *Euros Energy* sp. z o.o., która dotyczyła uzgodnienia kryteriów, metodyki, zagadnień prawnych oraz przygotowania studiów przypadków wybranych inwestycji w Polsce.

MAGAZYNY CIEPŁA – DEFINICJA I PODZIAŁ

Podziemne magazyny ciepła są elementem infrastruktury energetycznej umożliwiającą akumulację i przechowywanie ciepła w górotworze. Ich działanie polega na czasowym magazynowaniu nadwyżek energii, które mogą być wykorzystane w okresach zwiększonego zapotrzebo-

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; mateusz.zerun@pgi.gov.pl; ewa.jagoda@pgi.gov.pl; edyta.majer@pgi.gov.pl; grzegorz.ryzynski@pgi.gov.pl; kajetan.wczelik@pgi.gov.pl; M. Żeruń – 0000-0002-6824-5624; E. Jagoda – 0000-0002-7453-9362; E. Majer – 0000-0001-8489-2357; G. Ryżyński – 0000-0002-9766-7340

wania, co przyczynia się do poprawy bilansu energetycznego, ograniczenia strat energii i zwiększenia efektywności systemów grzewczych i chłodniczych.

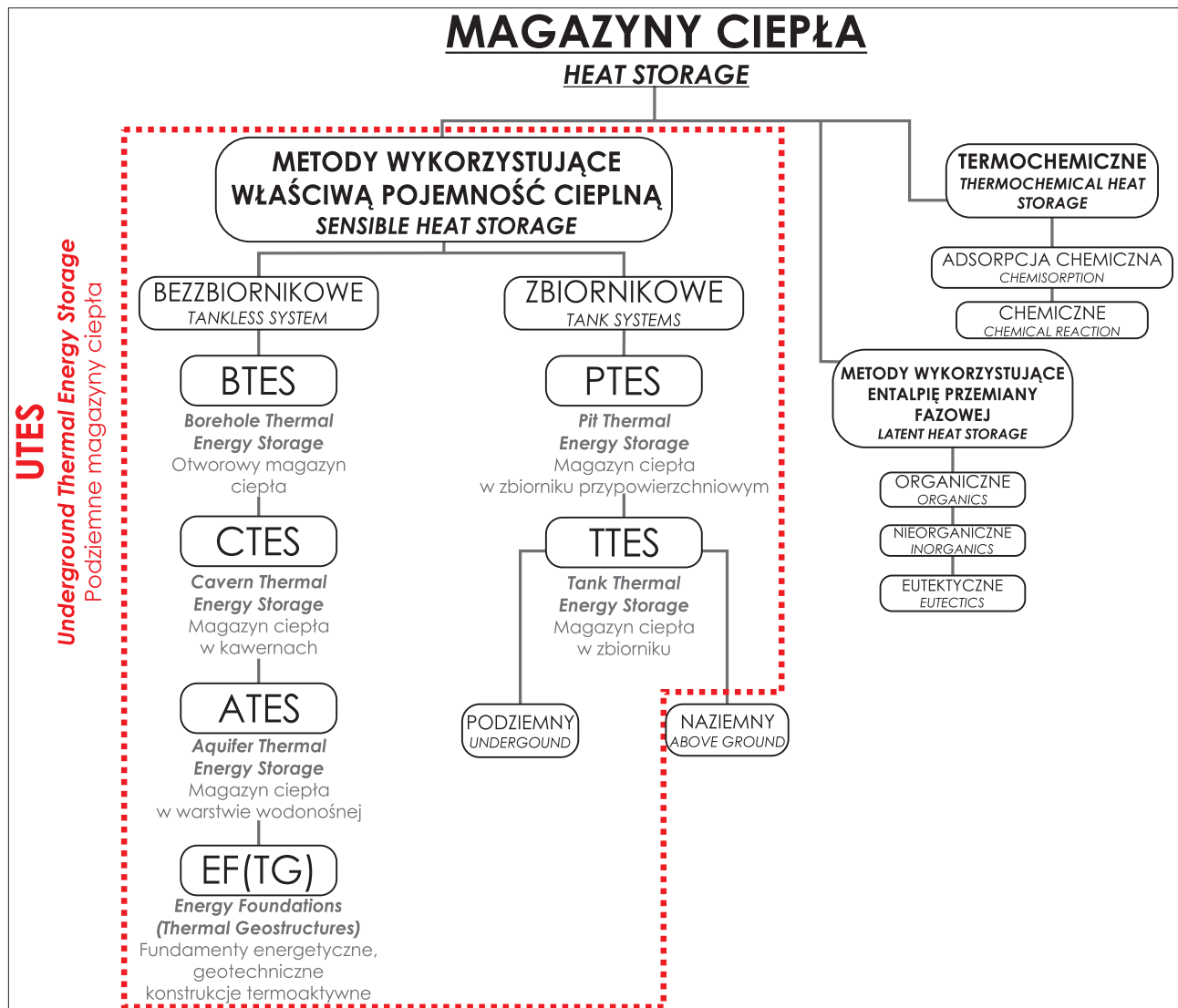
W systemach zamkniętych wymiana energii z górotworem zachodzi wyłącznie przez przewodzenie ciepła (czasem z udziałem konwekcji w ośrodku porowatym), bez przepływu masy między instalacją a otoczeniem. Nośnik ciepła, najczęściej woda lub roztwór glikolu, krąży w obiegu zamkniętym w wymiennikach lub w podziemnym zbiorniku umieszczonym w górotworze. W systemach otwartych energia jest wymieniana zarówno przez transport ciepła, jak i masy. Woda podziemna jest pompowana z warstwy wodonośnej do instalacji na powierzchni, gdzie oddaje lub pobiera ciepło, po czym trafia z powrotem do górotworu przez odwiert chłonny, zwykle do tej samej warstwy. W tym przypadku nośnikiem energii jest woda podziemna, a proces wykorzystuje naturalny lub wymuszony przepływ w ośrodku porowym.

Ze względu na technologię wykonania i użytkowania systemów typu UTES wyróżnia się (ryc. 1; Lee, 2013; Miecznik, 2016; Matos i in., 2019; Menéndez i in., 2019; Majer, Sokołowska, 2023; Żeruń i in., 2024b):

– zamknięte magazyny ciepła, do których należą:

- ❑ otworowe magazyny ciepła (BTES – *Borehole Thermal Energy Storages*);
 - ❑ magazyny ciepła w zbiornikach przypowierzchniowych (PTES – *Pit Thermal Energy Storages*);
 - ❑ magazyny ciepła w zbiornikach podziemnych (TTES – *Tank Thermal Energy Storages*);
 - ❑ fundamenty energetyczne (EF – *Energy Foundations*) i geotechniczne konstrukcje termoaktywne (TG – *Thermoactive Geostrutures*), np. termopale, termopłyty, termoobudowy i tunele termoaktywne;
- otwarte magazyny ciepła:
- ❑ magazyny ciepła w wyrobiskach górniczych (MTES – *Mine Thermal Energy Storage*);
 - ❑ magazyny ciepła w warstwie wodonośnej (ATES – *Aquifer Thermal Energy Storage*);
 - ❑ magazyny ciepła w kawernach (CTES – *Cavern Thermal Energy Storage*).

Zamknięte systemy magazynowania znajdują zastosowanie zarówno w lokalnych instalacjach indywidualnych, jak i wielkoskalowych projektach zintegrowanych z sieciami ciepłowniczymi. Każda z technologii podziemnego magazynowania ciepła w systemach zamkniętych charakteryzuje się odmienną konstrukcją, zasadą działania oraz



Ryc. 1. Rodzaje magazynów ciepła (Żeruń i in., 2024b)

Fig. 1. Types of heat storage (Żeruń et al., 2024b)

Tab. 1. Podstawowe cechy podziemnych magazynów ciepła (Žeruň i in., 2024b)
Table 1. Basic features of underground thermal energy storages (Žeruň et al., 2024b)

Cechy magazynu <i>System Characteristics</i>	Rodzaj podziemnego magazynu ciepła <i>Thermal Energy Storage System Type</i>			
	BTES	PTES	TTES	EF(TG)
Tryb pracy <i>Operation mode</i>	sezonowa <i>seasonal</i>	krótkoterminowa / <i>short-term</i> sezonowa / <i>seasonal</i>		
Głębokość konstrukcji [m p.p.t.] <i>Construction depth</i> [m b.g.l.]	30–300	5–15	5–15	<30 – w zależności od konstrukcji fundamentu <i>(nie dotyczy tuneli energetycznych)</i> <i>(not applicable to energy tunnels)</i>
Typ magazynu <i>Storage type</i>	bezzbiornikowy <i>tankless</i>	zbiornikowy <i>tank system</i>	zbiornikowy <i>tank system</i>	bezzbiornikowy <i>tankless</i>
Rodzaj medium akumulującego <i>Storage medium</i>	grunt / <i>soil</i> skała / <i>rock</i>	woda / <i>water</i> woda–żwir–piasek <i>water–gravel–sand</i>	woda / <i>water</i>	grunt / <i>soil</i> skała / <i>rock</i>
Rodzaj zasilanego obiektu <i>Type of supplied facility</i>	sieci ciepłownicze / <i>district heating</i>			–
	budynki wielkopowierzchniowe / <i>large commercial buildings</i>			–
	zastosowanie przemysłowe / <i>industrial use</i>			–
	–	budynki wielomieszkańciewe / <i>multi-family housing</i>		
	–	–	budynki jednorodzinne / <i>single-family houses</i>	
Temperatura medium magazynującego [°C] <i>Storage medium temperature</i> [°C]	<20°C	10–90°C	10–98°C	2–30°C termopale, ściany energetyczne, energetyczne płyty fundamentowe <i>energy piles, energy walls, foundation slabs</i>
	20–50°C			<60°C tunele energetyczne <i>energy tunnels</i>
	>50°C			
Funkcja magazynu <i>System function</i>	ogrzewanie / <i>heating</i>			
	chłodzenie / <i>cooling</i>	–	–	chłodzenie / <i>cooling</i>
Sposób ładowania magazynu <i>Charging sources</i>	panele słoneczne / <i>solar collectors</i>			
	ciepło odpadowe / <i>waste heat</i>			
	ciepło geotermalne <i>geothermal heat</i>	–	–	ciepło geotermalne <i>geothermal heat</i>
	pompa ciepła / <i>heat pump</i>			
	możliwe kombinacje wszystkich sposobów <i>any combination possible</i>	możliwe kombinacje wszystkich sposobów <i>any combination possible</i>	możliwe kombinacje wszystkich sposobów <i>any combination possible</i>	możliwe kombinacje wszystkich sposobów <i>any combination possible</i>
Wydajność magazynowania [%] <i>Storage efficiency</i> [%]	5–55%	> 80%	50–90%	brak danych <i>no data</i>
Korzystne warunki geologiczne i hydrogeologiczne <i>Favourable geological and hydrogeological conditions</i>	podłoże umożliwiające wiercenie otworów <i>conditions suitable for drilling</i> przewodność termiczna w zakresie 1,5–2,5 W/(m × K) <i>thermal conductivity in the range of 1.5–2.5 W/(m × K)</i> pojemność cieplna ośrodka >2,3 MJ/(m ³ × K) <i>heat capacity of the soil/rock >2.3 MJ/(m³ × K)</i> występowanie wód pod- ziemnych / szczelinowych o niskim przepływie <i>low groundwater flow velocity</i> niska przewodność hydrauliczna ośrodka <i>low hydraulic conductivity of the soil/rock</i>	podłoże umożliwiające wykonanie wkopu <i>subsurface allowing for excavation</i> preferowany brak wód podziemnych <i>preferably no groundwater</i> grunt umożliwiający wykorzystanie urobku jako nasywu wokół instalacji <i>soil allowing for the use of excavated material as an embankment around the installation</i> przewodność termiczna ośrodka <1,3 W/(m × K), <i>thermal conductivity of the soil/rock <1.3 W/(m × K)</i> niska przewodność hydrauliczna ośrodka <i>low hydraulic conductivity of the soil/rock</i>	podłoże umożliwiające wykonanie wkopu <i>subsurface allowing for excavation</i> preferowany brak wód podziemnych <i>preferably no groundwater</i> przewodność termiczna ośrodka <1,3 W/(m × K) <i>thermal conductivity of the soil/rock <1.3 W/(m × K)</i> niska przewodność hydrauliczna ośrodka <i>low hydraulic conductivity of the soil/rock</i>	podłoże umożliwiające wiercenie otworów <i>conditions suitable for drilling</i> przewodność termiczna w zakresie 1,5–2,5 W/(m × K) <i>thermal conductivity in the range of 1.5–2.5 W/(m × K)</i> pojemność cieplna ośrodka >2,3 MJ/(m ³ × K) <i>heat capacity of the soil/rock >2.3 MJ/(m³ × K)</i> występowanie wód podziemnych / szczelinowych o niskim przepływie <i>low groundwater flow velocity</i> niska przewodność hydrauliczna ośrodka <i>low hydraulic conductivity of the soil/rock</i>

zakresem zastosowań (tab. 1). Zasadniczo technologie te wykorzystują potencjał górotworu na dwa sposoby. Systemy BTES i EF/TG wykorzystują naturalne właściwości termiczne górotworu, takie jak przewodność termiczna i pojemność cieplna. W systemach BTES ciepło jest magazynowane i odbierane za pomocą zespołu pionowych, otworowych wymienników ciepła (ryc. 2), których głębokość i liczba zależą od planowanej pojemności magazynu oraz właściwości termicznych gruntu. Systemy EF i TG stanowią szczególny przypadek, w którym elementy konstrukcyjne obiektów budowlanych – takie jak fundamenty, ściany szczelinowe, pale fundamentowe czy obudowy tuneli – pełnią jednocześnie funkcję nośną, to znaczy przenoszą obciążenia na podłoże, a także funkcję wymiennika ciepła w magazynie energii. Z kolei w systemach PTES i TTES górotwór jest wykorzystywany jako przestrzeń do wykonania zbiornika magazynowego oraz jako naturalna osłona termiczna i wzmocnienie konstrukcji magazynu (ryc. 3). W tych systemach ciepło jest akumulowane w wodzie lub mieszaninie wodno-żwirowej znajdującej się w specjalnie zaprojektowanych zbiornikach (podziemnych lub przypowierzchniowych). Magazyny te są dodatkowo izolowane w celu minimalizacji strat ciepła.

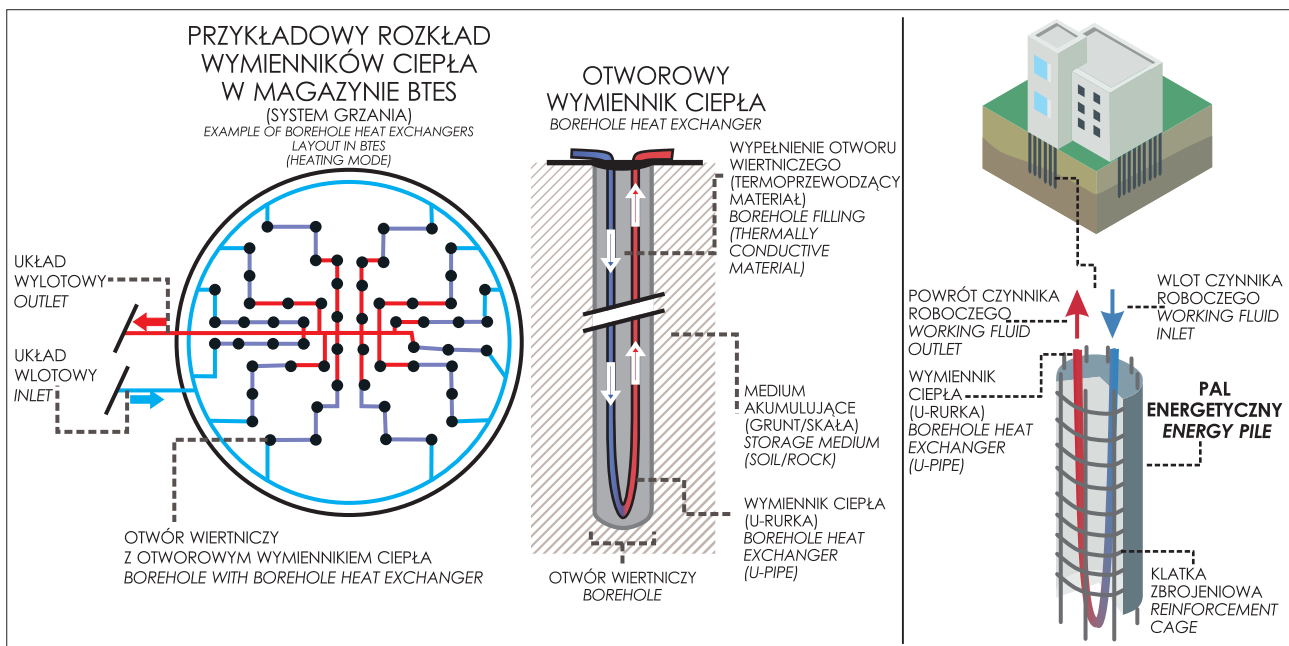
Koszty inwestycyjne podziemnych magazynów ciepła w systemach zamkniętych wykazują wyraźny efekt skali – wraz ze wzrostem pojemności magazynowania jednostkowe koszty inwestycyjne, wyrażone w €/m³ ekwiwalentu

wodnego (*water equivalent* – w_e), systematycznie maleją. Ekwiwalent wodny oznacza masę wody, która w danym zakresie temperatur pochłania lub oddaje taką samą ilość ciepła jak analizowany magazyn, niezależnie od rzeczywistego medium magazynującego. Zastosowanie tego ekwiwalentu umożliwia porównywanie różnych typów magazynów. Najwyższymi kosztami inwestycyjnymi charakteryzują się zbiorniki podziemne (TTES). Koszty budowy tego typu magazynów o mniejszych pojemnościach mogą sięgać kilkuset €/m³ w_e . Jednostkowe koszty instalacji magazynów gruntowych (PTES) są znacznie niższe i w przypadku dużych instalacji (pow. 50 000 m³) wynoszą kilkadziesiąt €/m³ w_e . Koszty inwestycyjne magazynów typu BTES osiągają kilkadziesiąt do 100 €/m³ w_e , w zależności od skali inwestycji i warunków geologicznych (Żeruć i in., 2024b).

Górotwór – jako ośrodek anizotropowy i wielofazowy, charakteryzujący się zróżnicowanymi właściwościami, w tym cieplnymi, mechanicznymi i wytrzymałościowymi – wpływa bezpośrednio na efektywność, trwałość oraz długoterminowe funkcjonowanie magazynów ciepła.

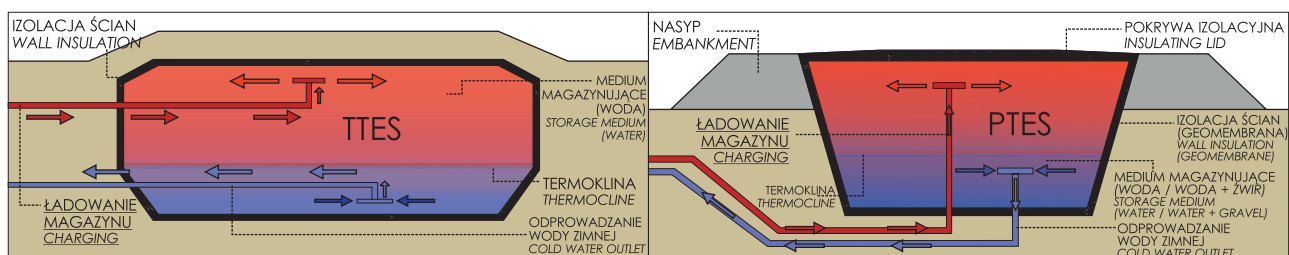
METODYKA

Dokonano przeglądu stanu wiedzy nt. rozwiązań technologicznych stosowanych w systemach zamkniętych typu BTES, PTES/TTES oraz EF/TG w Polsce, Europie i na świecie. Analizie poddano ponad 140 opracowań naukowych



Ryc. 2. Schematy systemów BTES i TG (Żeruć i in., 2024b)

Fig. 2. Schematic diagram of the BTES and TG systems (Żeruć et al., 2024b)



Ryc. 3. Schemat magazynu ciepła w zbiorniku podziemnym TTES i przypowierzchniowym PTES (Żeruć i in., 2024b)

Fig. 3. Schematic diagram of the TTES and PTES systems (Żeruć et al., 2024b)

i 12 raportów technicznych dotyczących dojrzałości technologicznej, uwarunkowań rynkowych oraz funkcjonowania instalacji wykorzystujących podziemne magazyny ciepła w systemach zamkniętych. Jednocześnie zbierano dostępne dane dotyczące lokalizacji w Polsce obiektów, w których występuje nadwyżka ciepła. Korzystając z wyników europejskich projektów *HeatRoadMap Europe* i *ReUseHeat* (udostępnionych na portalu <https://heatroadmap.eu/peta4/> w postaci przeglądarki *Pan-European Thermal Atlas 5.2*) uzyskano dane dotyczące nadwyżek ciepła 5088 obiektów. W pierwszej fazie wyboru lokalizacji pod ocenę możliwości budowy magazynu ciepła z analizy wyłączono takie obiekty, jak sklepy detaliczne, stacje metra i oczyszczalnie ścieków, obiekty z nadwyżkami energii cieplnej przekraczającymi 10 000 TJ, obiekty o niejasnym statusie lub lokalizacji, a także zlokalizowane w otoczeniu uniemożliwiającym zagospodarowanie terenu. W ten sposób spośród 5088 obiektów do dalszej analizy wytypowano 125 (ryc. 4).

W wyniku drugiego etapu selekcji do oceny warunków budowy podziemnych magazynów ciepła spośród 125 obiektów o nadwyżce energii cieplnej wyznaczono 25 obiektów. Selekcja polegała na uwzględnieniu:

- równomierności rozmieszczenia magazynów ciepła na obszarze Polski – aby były we wszystkich województwach;
- dostępności danych geologicznych;
- zróżnicowania pod względem warunków fizjograficznych i geomorfologicznych;
- regionalizacji geologiczno-inżynierskiej, w tym zróżnicowania pod względem geologicznym i hydrogeologicznym oraz występowania niekorzystnych zjawisk geologicznych wg Majer i in. (2018).

Listę obiektów wytypowanych do testowania metodyki oceny przydatności górotworu do magazynowania ciepła za pomocą systemów zamkniętych BTES, PTES/TTES i EF/TG przekazano do akceptacji władzom Ministerstwa Klimatu i Środowiska.

Następnie opracowano bazę danych umożliwiających charakterystykę, ocenę przydatności i wybór optymalnej lokalizacji magazynu ciepła (analizę przeprowadzono w buforach o promieniu 1000 m od źródła nadwyżki energii). Dane wykorzystano do analiz geoprzestrzennych i geostatystycznych, które są niezbędne do przeprowadzenia oceny i wyboru lokalizacji magazynu ciepła.

Baza zawiera dane:

- otworowe – wykorzystane do opracowania syntetycznych profili litologicznych;
- parametryczne – o właściwościach gruntów i skał, w tym o właściwościach termicznych, koniecznych do charakterystyki lokalizacji magazynu ciepła;
- przestrzenne, obejmujące warstwy informacyjne GIS o terenie i podłożu magazynu ciepła.

W ocenie przydatności terenu do budowy magazynu ciepła uwzględniono warunki geologiczne w strefie przypowierzchniowej obszaru wyznaczonego pod budowę magazynu ciepła i w jego profilu litologicznym, do głębokości uzależnionej od wybranej technologii budowy magazynu.

Kryteria oceny przydatności górotworu do lokalizacji podziemnych magazynów ciepła w systemach zamkniętych podzielono na dwie grupy:

– grupa I – kryteria służące ocenie ukształtowania terenu i procesów zachodzących w strefie przypowierzchniowej ziemi:

- spadki powierzchni terenu;

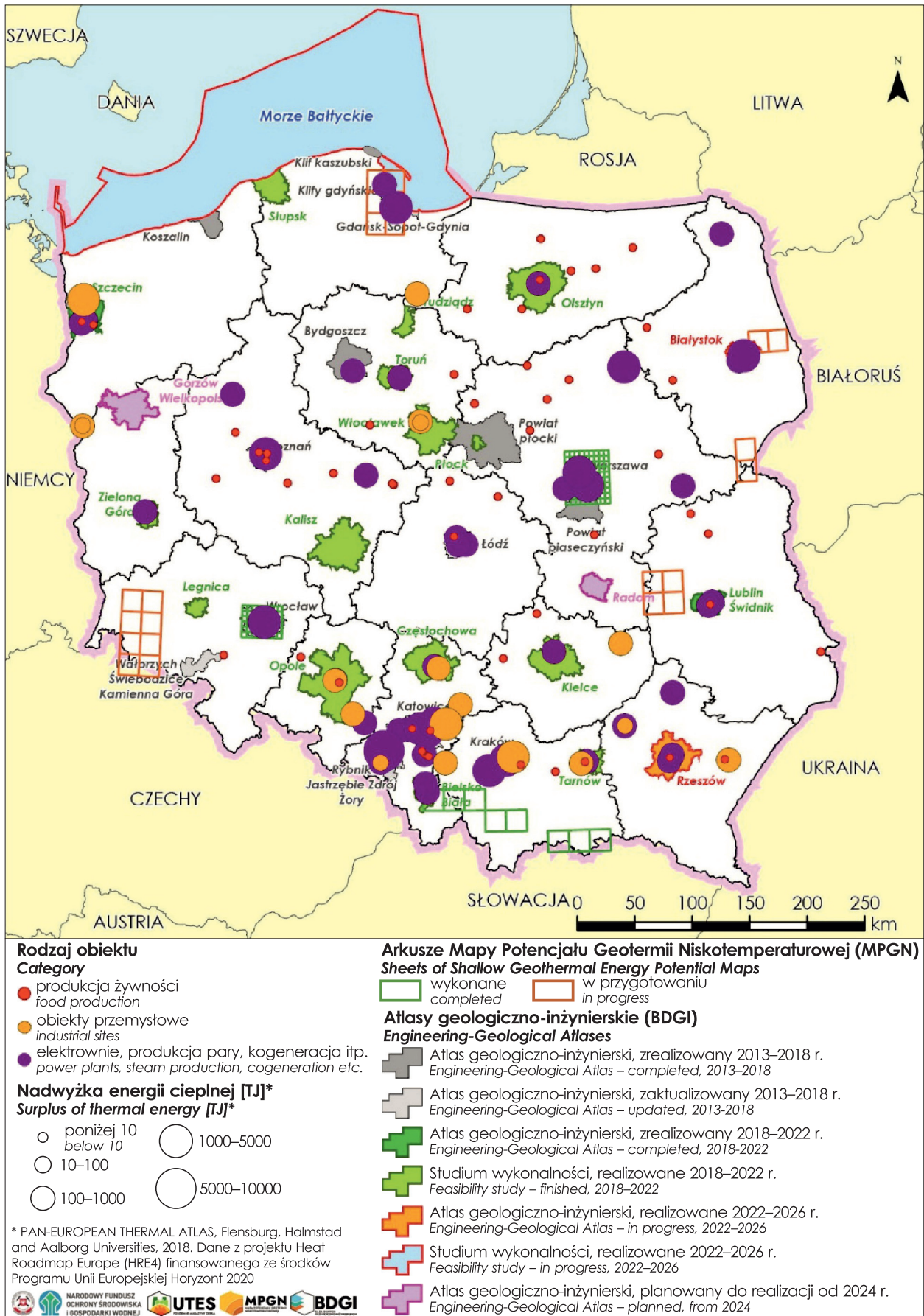
- forma geomorfologiczna;
- niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie;
- dostępność złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła;
- sezonowe wahania zwierciadła wód podziemnych;
 - grupa II – kryteria oceny właściwości ośrodka gruntowo-skalnego w profilu litologicznym pod kątem możliwości magazynowania energii cieplnej:
 - 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;
 - objętościowa pojemność cieplna gruntów i skał;
 - przydatność gruntów i skał z wykopów do wbudowania w nasyp;
 - głębokość do pierwszego zwierciadła wód podziemnych.

Opracowana metodyka umożliwiła sporządzenie rankingu przydatności lokalizacji 25 wytypowanych wcześniej obiektów do budowy magazynów ciepła, uwzględniającego różne technologie magazynowania ciepła w górotworze. Każdy z ocenianych obszarów scharakteryzowano, wypełniając karty lokalizacji podziemnych magazynów ciepła, zawierające: opis budowy geologicznej i zagospodarowania terenu, dokumentację fotograficzną i zakres wykonanych badań. Szczegółowe zasady przyznawania punktów i końcowy wynik umieszczono na karcie oceny. Przeprowadzono również analizę prawnych uwarunkowań wdrażania w Polsce systemów zamkniętych typu BTES, PTES/TTES i EF/TG. Rekomendacje wynikające z tej analizy i uproszczone schematy procedur prawno-administracyjnych zawarto w dokumencie *Aspekty formalno-prawne budowy i eksploatacji podziemnych magazynów energii cieplnej* (Konieczńska i in., 2024).

WYNIKI

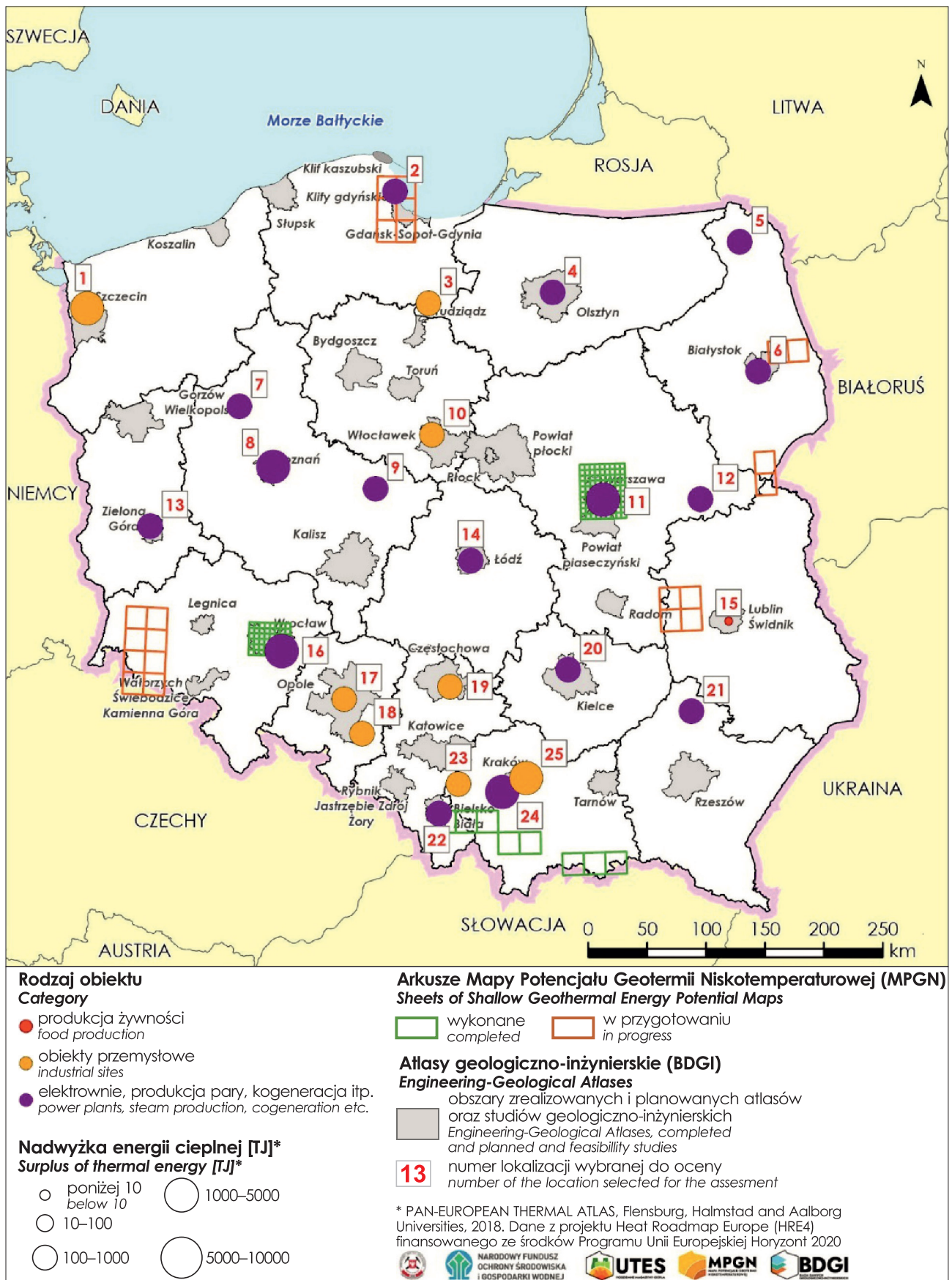
Kluczowym efektem prac są geologiczne i hydrogeologiczne kryteria i metodyka oceny przydatności górotworu do lokalizacji w nim podziemnych magazynów ciepła w systemach zamkniętych. Za najbardziej przydatne do budowy magazynów ciepła uznano obszary:

- o spadkach terenu nie przekraczających ok. 5°;
- na których nie występują niekorzystne zjawiska i procesy geologiczno-inżynierskie, np. krasowe, tektoniczne i sejsmiczne lub związane z działalnością górnictwem;
- oddalone nie więcej niż 20 km od złóż kopalin, które mogą być wykorzystane do budowy podziemnych magazynów ciepła;
- o sezonowych wahaniami zwierciadła wód podziemnych <1 m w ciągu roku;
- o jednorodnej budowie geologicznej;
- o gruntach łatwo urabialnych;
- o jednorodnej zwiercalności górotworu;
- pozbawione ryzyka przepływu wód podziemnych o dużej prędkości;
- o przewodności termicznej gruntów i skał w przedziale 1,5–2,5 W/(m × K) w kategorii BTES i EF lub <1,3 W/(m × K) w kategorii PTES/TTES;



Ryc. 4. Lokalizacja obiektów z nadwyżką energii cieplnej w Polsce (na podstawie Pan-European Thermal Atlas, 2018; Mapy Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej [W:] Ryżyński i in., 2023; https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/atlas_y)

Fig. 4. Map of selected facilities with surplus thermal energy (based on Pan-European Thermal Atlas, 2018; Shallow Geothermal Potential Maps [In:] Ryżyński et al., 2023; https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/atlas_y)



Ryc. 5. Lokalizacja obiektów z nadwyżką energii cieplnej w Polsce wskazanych do oceny przydatności do budowy podziemnych magazynów ciepła (na podstawie *Pan-European Thermal Atlas*, 2018; *Mapy Potencjału Geotermii Niskotemperaturowej* [W:] Ryżyński i in., 2023)
Fig. 5. Location of objects with a surplus of thermal energy in Poland, indicated for the assessment of suitability for the construction of underground heat storage (based on *Pan-European Thermal Atlas*, 2018; *Shallow Geothermal Potential Maps* [In:] Ryżyński et al., 2023)

- ❑ o objętościowej pojemności cieplnej gruntów i skał $>2,3 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \times \text{K})$ w kategorii BTES i EF lub $>2,0 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \times \text{K})$ w kategorii PTES/TTES;
- ❑ o gruntach i skałach z wykopów przydatnych do wbudowania w nasyp, np. niespoistych;
- ❑ o głębokości do pierwszego zwierciadła wód podziemnych poniżej posadowienia magazynu;
- ❑ o podłożu przydatnym do posadowienia podziemnego magazynu ciepła.

Opracowaną metodykę oceny przydatności górotworu do magazynowania ciepła przetestowano, analizując warunki geologiczne w otoczeniu wytypowanych 25 obiektów (ryc. 5). Wyniki analiz zawarto w dokumencie *Ocena wskazanych lokalizacji pod kątem możliwości budowy magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF) w tym ranking lokalizacji* (Żeruń i in., 2024c). Kryteria lokalizowania magazynów ciepła w górotworze (geologiczne, techniczne, ekonomiczne, środowiskowe, administracyjno-prawne, społeczne i polityczne) i metodykę oceny przydatności górotworu do podziemnego magazynowania ciepła szczegółowo opisali Żeruń i in. (2024b) w dokumencie *Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)*, udostępnionym na stronie internetowej <https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/15623-btes.html>.

WNIOSKI

Transformacja ciepłownictwa i modeli funkcjonowania rynku ciepła sprawiają, że konieczna jest kontynuacja prac związanych z typowaniem i oceną obszarów do budowy podziemnych magazynów ciepła w systemach zamkniętych zarówno na potrzeby indywidualne, jak i systemowe. Niezbędna jest edukacja oraz prowadzenie prac promocyjnych i popularyzujących wiedzę o możliwości podziemnego magazynowania ciepła, aby zwiększyć dostęp do tego typu technologii. Wskazane jest prowadzenie ogólnopolskiej bazy danych o magazynach ciepła w podziale na rodzaj technologii, wielkość i moc magazynu ciepła oraz źródło nadwyżki energii cieplnej i elektrycznej, a także przygotowanie kompleksowych zmian w prawie w zakresie magazynów ciepła, aby umożliwić rozwój tego rodzaju technologii.

Autorzy składają podziękowania Recenzentom i całemu zespołowi biorącemu udział w realizacji zadania państwowej służby geologicznej. Zadanie pn. *Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF) w wybranych lokalizacjach na terenie Polski* zostało zrealizowane przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy w latach 2023–2024 i sfinansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na podstawie umowy nr 288/2023/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 21.06.2023 r.

LITERATURA

<https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/>
https://geoportal.pgi.gov.pl/atlas_y_gi/atlas_y
<https://www.pgi.gov.pl/inzynierska/1-geologia-inzynierska/gi-projekty/15623-btes.html>
 KŁONOWSKI M.R., KOCYŁA J., RYŻYŃSKI G., ŻERUŃ M. 2020 – Evaluation and statistical interpretation of low-temperature geothermal energy potential for selected locations in Poland. *Geological Quarterly*, 64 (2): 506–514.

KONIECZYŃSKA M., CZARNECKA M., FABIAŃCZUK A., KEMBLÓWSKI M., KUCHARSKA A., KURKUS M., ŁASKI B., OLENDER A., SIKORSKI K., SZAMBELAŃCZYK M., URBAN S., WARZAŃSKA M., WYRZYKOWSKA A. 2024 – Aspekty formalno-prawne budowy i eksploatacji podziemnych magazynów energii cieplnej. *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.-PIB i WKB Lawyers, Warszawa*.

LEE K.S. 2013 – *Underground Thermal Energy Storage*. Springer, London.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z. (red.), BARAŃSKI M., BESTYŃSKI Z., OSTROWSKI S., PASIECZNA A., PIETRZYKOWSKI P., PRZYŁUCKA M., BŁACHNIO O., CHADA M., CZARŃIAK 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)*. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.

MAJER E., SOKOŁOWSKA M. (red.), FRANKOWSKI Z., ADAMUSZEK M., CZAPOWSKI G., FAJFER J., JAROSIŃSKI M., MAJER K., SZABŁOWSKA M., SAMEL I., WÓJCIK A., MAZUREK S., ROSZKOWSKA-REMIN J., CYGLICKI M., KORZENIOWSKI W., ŁUKASIAK D. 2023 – *Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezbiomikowego magazynowania i składowania*. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.

MENÉNDEZ J., ORDÓNEZ A., ÁLVAREZ R., LOREDO J. 2019 – Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108: 498–512.

MIECZNIK M. 2016 – Podziemne magazynowanie energii cieplnej – metody i zastosowania. *Przegląd Geologiczny*, 64 (7): 464–471.

MATOS C.R., CARNEIRO J.F., SILVA P.P. 2019 – Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21: 241–258.

OBWIESZCZENIE Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r. *Monitor Polski*, 2021 r. poz. 264.

PAN-EUROPEAN Thermal Atlas, 2018 – <https://heatroadmap.eu/peta/4/>
 RYŻYŃSKI R., KOZDRÓJ W., SZLASA M. (red.), KŁONOWSKI M., ŻERUŃ M., WOJTASZEK P., ŁUKAWSKA A., SZLASA M., WYRWALSKA U., KOWALSKI A., MYDŁOWSKI A., KOCYŁA J., GAĞULSKI T., TOTT M., CZARŃIAK P., PACANOWSKI G., MAJER E., SOKOŁOWSKA M., LASOCKI M., OSTROWSKI S., FRANKOWSKI Z., BONIEWSKA K., NOWACKI Ł., CHEŁMIŃSKI J., ZIÓŁKOWSKA-KOZDRÓJ M., ZAWŁOCKI J., ZAWISTOWSKI K., SAMEL I., STAWICKA A., KOBIELA J., JAGODA E., WCZELIK K., MAJER K. 2023 – Instrukcja wykonywania map potencjału i uwarunkowań środowiskowych geotermii niskotemperaturowej. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.

WIELOLETNI PROGRAM Rozwoju Wykorzystania Zasobów Geotermalnych w Polsce (Mapa drogowa rozwoju geotermii do 2040 r., z perspektywą do 2050 r.). Ministerstwo Klimatu i Środowiska, 2022, <https://www.gov.pl/web/klimat/mapa-drogowa-rozwoju-geotermii-w-polsce>
 ŻERUŃ M., JAGODA E., MAJER E., ŁUKAWSKA A., MAJER K., RYŻYŃSKI G., SAMEL I. 2024a – Adaptation of Engineering-Geological Database for Very Shallow Geothermal Potential Mapping of the Urban Areas. Case study: Warsaw. *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 12–14 February 2024.

ŻERUŃ M., JAGODA E., MAJER E., RYŻYŃSKI G. (red.), SZLASA M., WCZELIK K., MAJER K., PLUTA P., JABŁOŃSKI J., STEFAŃSKA P., BONIEWSKA K., WOJTASZEK P., KOBIELA J., SOBÓTKA P., STAWICKA A. 2024b – Ocena możliwości lokalizowania magazynów ciepła w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF). *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.-PIB*.

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. 2024c – Ocena wskazanych lokalizacji pod kątem możliwości budowy magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF) z wykorzystaniem dokumentu pn. „Ocena możliwości lokalizowania magazynów energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF)” w tym ranking lokalizacji. *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.-PIB*.

Praca wpłynęła do redakcji 19.05.2025 r.
 Akceptowano do druku 2.07.2025 r.