

Numeryczne modelowanie sezonowego magazynowania ciepła w górotworze z wykorzystaniem technologii BTES

Numerical modelling of seasonal heat storage in the subsurface using BTES technology

Tadeusz Kwilosz, Bogdan Filar, Agnieszka Moska, Mariusz Miziołek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł ma charakter koncepcyjno-numeryczny i nie odwzorowuje konkretnej lokalizacji geologicznej. Jego celem jest porównanie wpływu właściwości ośrodka skalnego oraz przepływu wód podziemnych na bilans cieplny sezonowego magazynu BTES (ang. borehole thermal energy storage). W programie FEFLOW zbudowano trójwymiarowy model o wymiarach $200 \times 200 \times 90$ m, obejmujący niskoprzepuszczalne warstwy łupku ilastego oraz 70-metrowy kompleks magazynujący reprezentowany alternatywnie przez iłowiec albo nasycony wodą piaskowiec. W modelu umieszczono 13 otworowych wymienników ciepła BHE, odwzorowanych jako osadzone elementy jednowymiarowe sprzężone cieplnie z trójwymiarowym ośrodkiem porowatym. Przeanalizowano cztery warianty: iłowiec i piaskowiec przy zerowym gradiencie hydraulicznym oraz przy spadku wysokości hydraulicznej 0,5 m na długości 200 m. W wariantcie iłowcowym bez przepływu dostarczono 1391,93 MWh i odebrano 633,01 MWh (współczynnik odzysku 45,48%), natomiast przy przepływie – odpowiednio 1388,79 MWh i 641,21 MWh (46,20%). W piaskowcu bez przepływu dostarczono 1915,52 MWh i odebrano 989,28 MWh (51,65%), a przy przepływie 2068,30 MWh i 927,54 MWh (44,85%). Wyższa przewodność i pojemność cieplna piaskowca zwiększały zdolność przyjmowania ciepła, natomiast adwekcja w tym ośrodku przemieszczała część plamy cieplnej poza pole BHE i obniżała odzysk o około 6,8 punktu procentowego. Różnica między wariantami iłowcowymi wyniosła jedynie 0,72 punktu procentowego i nie stanowi wystarczającej podstawy do stwierdzenia korzystnego wpływu przepływu. Wyniki należy traktować jako analizę porównawczą przyjętych założeń, wymagającą kalibracji i walidacji przed zastosowaniem projektowym.

Słowa kluczowe: magazynowanie ciepła, BTES, otworowy wymiennik ciepła, FEFLOW, przepływ wód podziemnych, modelowanie numeryczne.

ABSTRACT: This paper presents a conceptual numerical study and does not reproduce a specific geological site. Its objective is to compare the effects of host-rock properties and groundwater flow on the thermal balance of a seasonal Borehole Thermal Energy Storage (BTES) system. A three-dimensional FEFLOW model measuring $200 \times 200 \times 90$ m was developed. It consists of low-permeability shale confining layers and a 70 m thick storage complex represented alternatively by mudstone or water-saturated sandstone. Thirteen borehole heat exchangers (BHEs) were represented as embedded one-dimensional elements thermally coupled to the three-dimensional porous medium. Four scenarios were analysed: mudstone and sandstone under a zero hydraulic gradient and under a hydraulic-head drop of 0.5 m over 200 m. For mudstone without flow, 1391.93 MWh was supplied and 633.01 MWh was recovered (thermal recovery ratio 45.48%); with flow, the corresponding values were 1388.79 MWh and 641.21 MWh (46.20%). For sandstone without flow, 1915.52 MWh was supplied and 989.28 MWh was recovered (51.65%); with flow, 2068.30 MWh was supplied and 927.54 MWh was recovered (44.85%). The higher thermal conductivity and volumetric heat capacity of sandstone increased heat acceptance, whereas advection displaced part of the thermal plume beyond the BHE field and reduced recovery by about 6.8 percentage points. The difference between the two mudstone scenarios was only 0.72 percentage points and is insufficient to demonstrate a beneficial effect of groundwater flow. The results should therefore be interpreted as a comparative analysis of the adopted assumptions and require calibration and validation before design application.

Keywords: heat storage, BTES, borehole heat exchanger, FEFLOW, groundwater flow, numerical modelling.

Autor do korespondencji: T. Kwilosz, e-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 04.02.2026 r. Zatwierdzono do druku: 31.08.2026 r.

Wstęp

Sezonowe magazynowanie ciepła ogranicza niedopasowanie czasowe między dostępnością ciepła odpadowego lub energii ze źródeł odnawialnych, a zapotrzebowaniem systemów ciepłowniczych. W technologii BTES (ang. *borehole thermal energy storage*) ciepło jest wprowadzane do dużej objętości gruntu lub skał za pośrednictwem zamkniętego obiegu czynnika roboczego w pionowych otworowych wymiennikach ciepła, najczęściej w układzie pojedynczej albo podwójnej U-rurki. Latem magazyn może być ładowany ciepłem z kolektorów słonecznych, procesów przemysłowych, centrów danych, elektrociepłowni lub instalacji termicznego przekształcania odpadów, natomiast zimą zgromadzone ciepło jest odbierane bezpośrednio albo z udziałem pompy ciepła. Technologia ma zastosowanie przede wszystkim w systemach ciepłownictwa obszarowego i układach *solar district heating* (Lundh i Dalenbäck, 2008; Lanahan i Tabares-Velasco, 2017; Ramstad i in., 2023; Sadeghi i in., 2024).

W odróżnieniu od ATES (ang. *aquifer thermal energy storage*), w którym energia jest magazynowana i transportowana wraz z wodą pompowaną pomiędzy otworami w warstwie wodonośnej, BTES jest systemem zamkniętym: czynnik roboczy nie kontaktuje się bezpośrednio z wodą podziemną, a podstawowym mechanizmem wymiany jest przewodzenie ciepła pomiędzy wymiennikiem i matrycą skalną. Przepływ wody w porach może jednak wprowadzać składnik adwekcyjny i przemieszczać plamę cieplną. Z tego względu parametry termiczne, porowatość, przepuszczalność, gradient hydrauliczny oraz geometria pola w pionowych otworowych wymiennikach ciepła (ang. *borehole heat exchangers*, BHE) są istotnymi kryteriami lokalizacyjnymi i projektowymi. W Polsce problem ten był przedmiotem projektu PIG-PIB dotyczącego oceny możliwości lokalizowania magazynów BTES, PTES/TTES i EF w 25 obiektach wielkoskalowych (PIG-PIB, 2024; Żeruń i in., 2024).

Do analizy takich układów stosuje się sprzężone modele przepływu wód podziemnych i transportu ciepła. FEFLOW jest oprogramowaniem wykorzystującym metodę elementów skończonych, umożliwiającym odwzorowanie ośrodka porowatego, warunków brzegowych oraz BHE jako osadzonych elementów jednowymiarowych. Najnowsze badania wskazują, że wpływ przepływu wód podziemnych jest zależny od celu pracy systemu: może zwiększać chwilową wymianę ciepła pojedynczego BHE, lecz w magazynie sezonowym może również wynosić energię poza obszar późniejszego odbioru (Piiipponen i in., 2024; Asan i in., 2025).

Celem pracy jest porównawcza ocena wpływu dwóch idealizowanych typów ośrodka magazynującego: ilowca i nasyconego wodą piaskowca oraz dwóch stanów hydraulicznych: braku

przepływu i przepływu wymuszonego spadkiem wysokości hydraulicznej – na ilość ciepła dostarczanego i odzyskiwanego z pola 13 BHE. Praca ma charakter koncepcyjno-numeryczny: parametry nie pochodzą z kalibracji konkretnej lokalizacji, a wyniki służą identyfikacji mechanizmów i kierunków zmian, nie zaś bezpośredniemu projektowaniu instalacji.

Podstawy modelu matematycznego

Transport ciepła w ośrodku porowatym

Rozkład temperatury w nasyconym lub częściowo nasyconym ośrodku porowatym opisano równaniem bilansu energii, uwzględniającym akumulację, przewodzenie, adwekcję oraz źródła lub ujścia ciepła (Bear i Bachmat, 1986; Nield i Bejan, 2013; Diersch, 2014):

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) - \rho_w c_w v \cdot \nabla T + q_T \quad (1)$$

gdzie:

T – temperatura [K lub °C],

t – czas [s],

$\partial T / \partial t$ – pochodna temperatury po czasie (szybkość zmiany temperatury w czasie),

∇T – gradient temperatury (wektor zmiany temperatury w przestrzeni),

$\nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T)$ – dywergencja strumienia przewodzenia ciepła (opis przewodzenia ciepła w ośrodku),

$(\rho c)_{eff}$ – efektywna pojemność cieplna właściwa na jednostkę objętości ośrodka [J/(m³·K)],

λ_{eff} – efektywny współczynnik przewodzenia ciepła ośrodka (uwzględnia np. fazę stałą i wodę) [W/(m·K)],

ρ_w – gęstość wody (lub ogólnie płynu przepływającego w porach) [kg/m³],

c_w – ciepło właściwe wody (płynu) [J/(kg·K)],

v – wektor prędkości przepływu wody (np. prędkość filtracji w ośrodku porowatym) [m/s],

q_T – źródło ciepła w jednostce objętości [W/m³].

Dla wariantu bez przepływu przyjmowano $v = 0$, dlatego transport ciepła był kontrolowany przez przewodzenie. W wariantach z gradientem hydraulicznym składnik $\rho_w c_w v \cdot \nabla T$ powodował adwekcyjne przemieszczanie energii wraz z wodą porową. FEFLOW rozwiązuje powyższe równanie w przestrzeni trójwymiarowej metodą elementów skończonych (Diersch, 2014; DHI, 2024).

Sprężenie otworowego wymiennika ciepła z górotworem

W FEFLOW otworowy wymiennik ciepła BHE jest reprezentowany jako osadzony element jednowymiarowy połączony

z węzłami trójwymiarowej siatki. Bilans energii płynu wzdłuż wymiennika można zapisać w postaci:

$$(mpc)_{eff} \frac{\partial Tf}{\partial t} = -q'(z) \quad (2)$$

natomiast liniowy strumień ciepła przekazywany pomiędzy płynem i ścianą otworu jako:

$$q'(z) = [Tf(z) - Tb(z)] / Rb \quad (3)$$

Symbole oznaczają:

m – strumień masy płynu,

Tf – temperaturę płynu,

Tb – temperaturę na granicy BHE–ośrodek,

Rb – efektywny opór cieplny otworu, obejmujący opory konwekcyjne w rurze, przewodzenie przez ściankę rury i wypełnienie otworu.

Strumień q' jest w modelu 3D źródłem albo ujściem ciepła. FEFLOW umożliwia obliczenia quasistacjonarne lub w pełni nieustalone oraz połączenia BHE szeregowo i równoległe (DHI, b.d.). Czynnikiem roboczym w analizowanym modelu była woda. Do bilansu przyjęto stałe właściwości reprezentatywne dla zakresu temperatur modelu: gęstość około 1000 kg/m³, ciepło właściwe 4,18 kJ/(kg·K) i objętościową pojemność cieplną około 4,18 MJ/(m³·K). Geometrię i właściwości elementów BHE utrzymywano jednakowe we wszystkich czterech wariantach, aby izolować wpływ litologii i przepływu. Szczegółowa analiza wrażliwości na średnicę rur, grubość ścianek, przewodność materiału rur i wypełnienia otworu nie była przedmiotem pracy; parametry te powinny być zweryfikowane na etapie modelu projektowego.

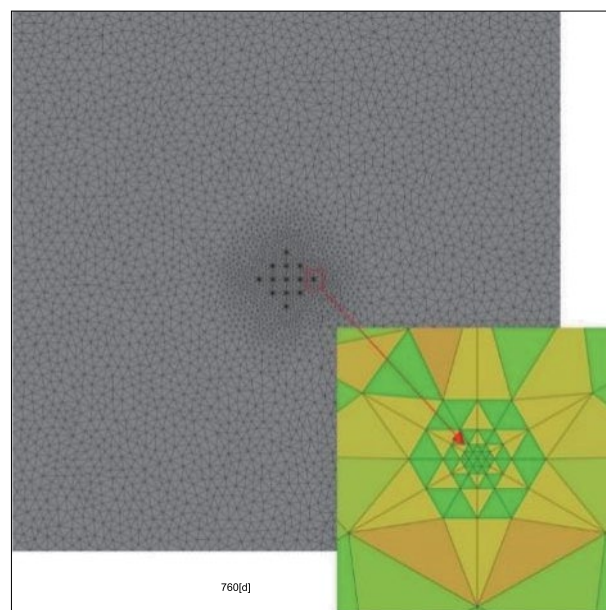
Model koncepcyjny i implementacja w programie FEFLOW

Cel, geometria i litologia modelu

Przyjęto idealizowany model warstwowy o wymiarach 200 × 200 × 90 m, odpowiadający przedziałowi głębokości od 0 do 90 m względem stropu modelu. Nie przypisano go do konkretnej lokalizacji. Profil podzielono na 11 warstw: górną warstwę łupku ilastego o miąższości 5 m, kompleks magazynujący o miąższości 70 m (warstwy 2–8, po 10 m) oraz dolny kompleks łupku ilastego o łącznej miąższości 15 m (warstwy 9–11, po 5 m). Łupki pełnią w modelu funkcję niskoprzepuszczalnego otoczenia ograniczającego przepływ pionowy. Kompleks magazynujący reprezentowano alternatywnie przez ilowiec o małej przepuszczalności albo przez bardziej porowaty i przepuszczalny piaskowiec. W obu przypadkach przestrzeń porowa w strefie nasyconej była wypełniona wodą; określenie „bez przepływu” oznacza zerowy gradient hydrauliczny, a nie brak wody w porach.

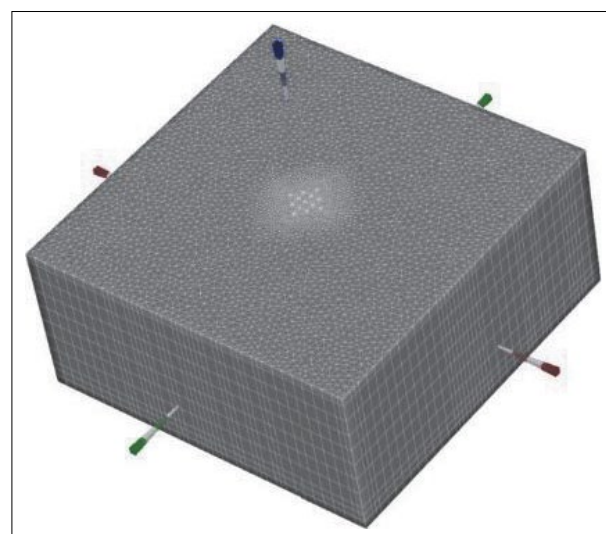
Dyskretyzacja i parametry materiałowe

Obszar obliczeniowy zdyskretyzowano trójkątną siatką elementów skończonych. W sąsiedztwie każdego BHE zastosowano funkcję *Add satellite points*, czyli lokalne wprowadzenie dodatkowych węzłów tworzących pierścienie małych elementów wokół osi otworu. Zabieg ogranicza błąd aproksymacji dużego gradientu temperatury w strefie przyotworowej. Rysunek 1 przedstawia siatkę i lokalne zagęszczenie, a rysunki 2 i 3 – geometrię przestrzenną oraz przypisanie kompleksów litologicznych.



Rysunek 1. Siatka elementów skończonych i lokalne zagęszczenie w sąsiedztwie BHE

Figure 1. Finite-element mesh and local refinement around a BHE

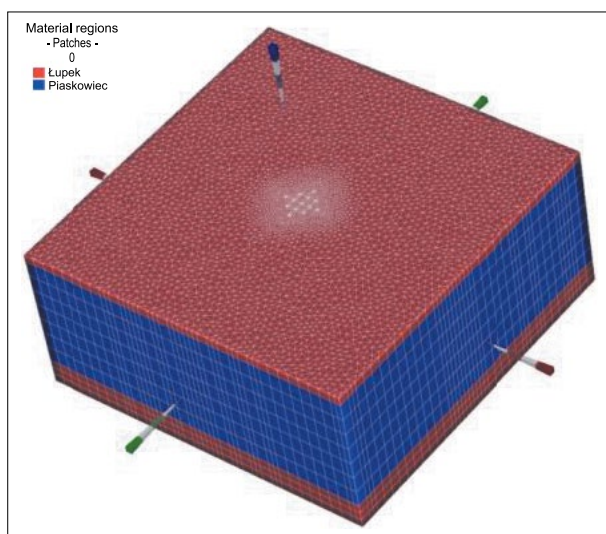


Rysunek 2. Geometria trójwymiarowego obszaru obliczeniowego i podział pionowy na 11 warstw

Figure 2. Three-dimensional computational domain and its vertical division into 11 layers

Tabela 1. Przyjęte parametry hydrauliczne i cieplne ośrodków
Table 1. Adopted hydraulic and thermal properties of the media

Parametr	Łupek ilasty	Skala magazynująca	
		iłowiec	piaskowiec
Współczynnik filtracji $K_{xx} = K_{yy}$ [m/d]	0,000000864	0,0086	0,864
Współczynnik filtracji K_{zz} [m/d]	0,000000864	0,00086	0,0864
Porowatość [-]	0,003	0,006	0,1
Objętościowa pojemność cieplna [MJ/(m ³ ·K)]	3,0	2,3	4,69
Przewodność cieplna [W/(m·K)]	2,4	2,25	3,7



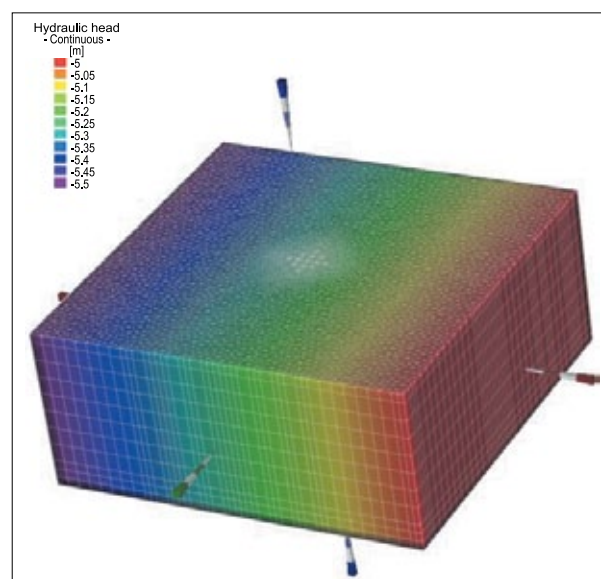
Rysunek 3. Model 3D z przypisaniem niskoprzepuszczalnych warstw łupku i kompleksu magazynującego

Figure 3. Three-dimensional model showing low-permeability shale layers and the storage complex

Parametry hydrauliczne i cieplne zestawiono w tabeli 1. Są to wartości przyjęte do analizy porównawczej, a nie parametry skalibrowane na podstawie badań rdzeni, testów TRT lub dokumentacji hydrogeologicznej. Współczynniki filtracji w kierunku pionowym przyjęto dziesięciokrotnie mniejsze od wartości poziomych, aby odwzorować anizotropię warstwowania.

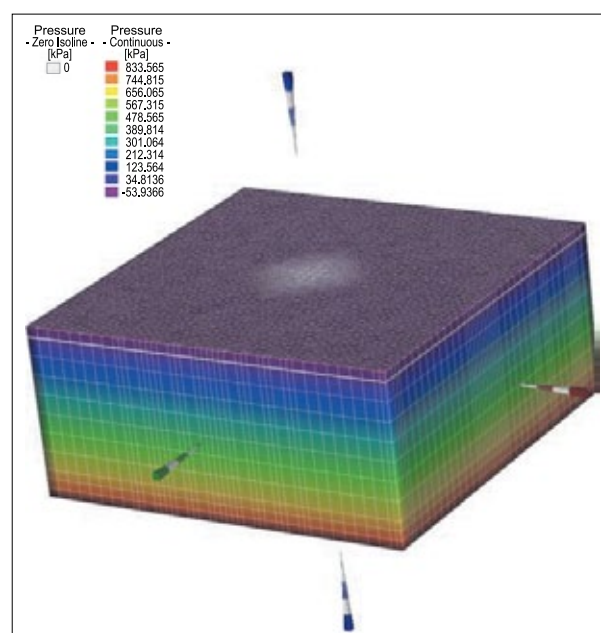
Warunki początkowe i hydrauliczne

Przed obliczeniami transportu ciepła wyznaczono ustalony rozkład wysokości hydraulicznej i nasycenia, który stanowił warunek początkowy symulacji nieustalanej. Rozpatrzono dwa stany: (1) jednakową wysokość hydrauliczną $-5,0$ m na przeciwnych granicach modelu, odpowiadającą zerowemu gradientowi oraz (2) wartości $-5,0$ m i $-5,5$ m, odpowiadające spadkowi $0,5$ m na długości 200 m, czyli gradientowi $i = 0,0025$. Przy tym gradiencie strumień Darcy'ego $q = Ki$ wynosi około $2,15 \cdot 10^{-5}$ m/d w iłowcu i $2,16 \cdot 10^{-3}$ m/d w piaskowcu. Po podzieleniu przez porowatość otrzymuje się orientacyjne prędkości porowe odpowiednio $0,0036$ m/d i $0,0216$ m/d. Różnica prawie jednego rzędu wielkości jest podstawową



Rysunek 4. Rozkład wysokości hydraulicznej w warunkach ustalonego przepływu (spadek $0,5$ m na 200 m)

Figure 4. Steady-state hydraulic-head distribution (0.5 m drop over 200 m)



Rysunek 5. Rozkład stopnia nasycenia i położenie zwierciadła wody
Figure 5. Saturation distribution and water-table position

przesłanką do oczekiwania silniejszej adwekcji w piaskowcu. Rysunek 4 przedstawia rozkład wysokości hydraulicznej dla wariantu z gradientem, a rysunek 5 – rozkład stopnia nasycenia i położenie zwierciadła wody. Warunek temperatury 10°C na granicy dopływu oznacza, że w wariantach przepływowych do domeny napływa woda chłodniejsza od nagrzanej strefy magazynu.

Reprezentacja BHE i plan eksploatacji

Pole BTES obejmuje 13 pionowych BHE o średnicy otworu 0,15 m, odwzorowanych jako pojedyncze U-rurki. Górny koniec aktywnej części wymiennika znajduje się na głębokości 15 m, a długość czynna wynosi 60 m, dlatego dolny koniec sięga głębokości 75 m. Każdy BHE jest osadzonym elementem 1D sprzężonym z węzłami siatki 3D. Początkową temperaturę ośrodka i wody porowej przyjęto równą 10°C. W wariantach przepływowych na granicy dopływu zadano również temperaturę 10°C.

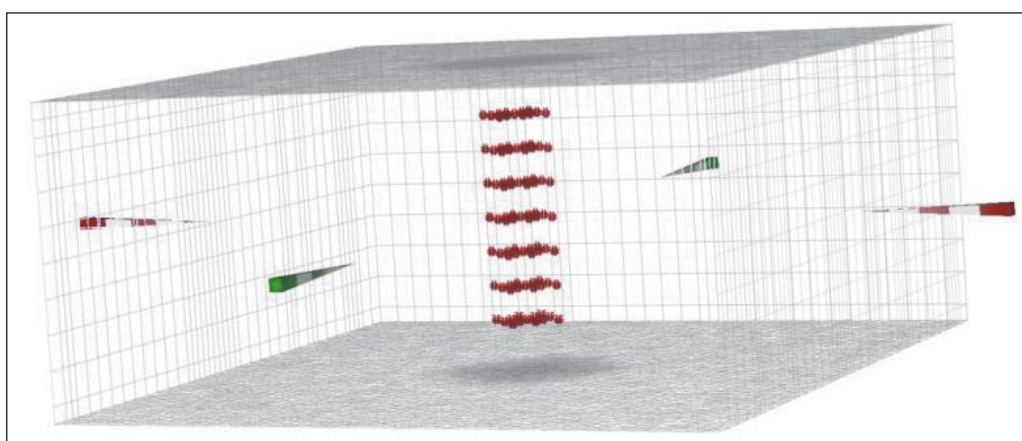
Symulacja obejmowała łącznie 3650 dni. W pierwszym etapie magazyn ładowano nieprzerwanie przez 730 dni.

Następnie przeprowadzono osiem cykli rocznych, z których każdy obejmował 150 dni odbioru ciepła, 30 dni postoju, 150 dni ponownego ładowania i 35 dni postoju. Podczas ładowania temperatura wody na wlocie wynosiła 70°C, podczas odbioru 10°C, a zadany strumień objętościowy wynosił 40 m³/d. Trzynaście BHE połączono w cztery obiegi szeregowo (rysunek 7). Ciepło wprowadzano przez BHE położone bliżej centrum pola, a odbierano przez wymienniki zewnętrzne, co miało ograniczać bezpośrednie zwarcie termiczne pomiędzy wlotem i wylotem.

Warianty obliczeniowe

W celu rozdzielenia wpływu litologii i adwekcji wykonano cztery warianty obliczeniowe:

- iłowiec, zerowy gradient hydrauliczny;
- iłowiec, gradient hydrauliczny $i = 0,0025$;
- piaskowiec nasycony wodą, zerowy gradient hydrauliczny;
- piaskowiec nasycony wodą, gradient hydrauliczny $i = 0,0025$.



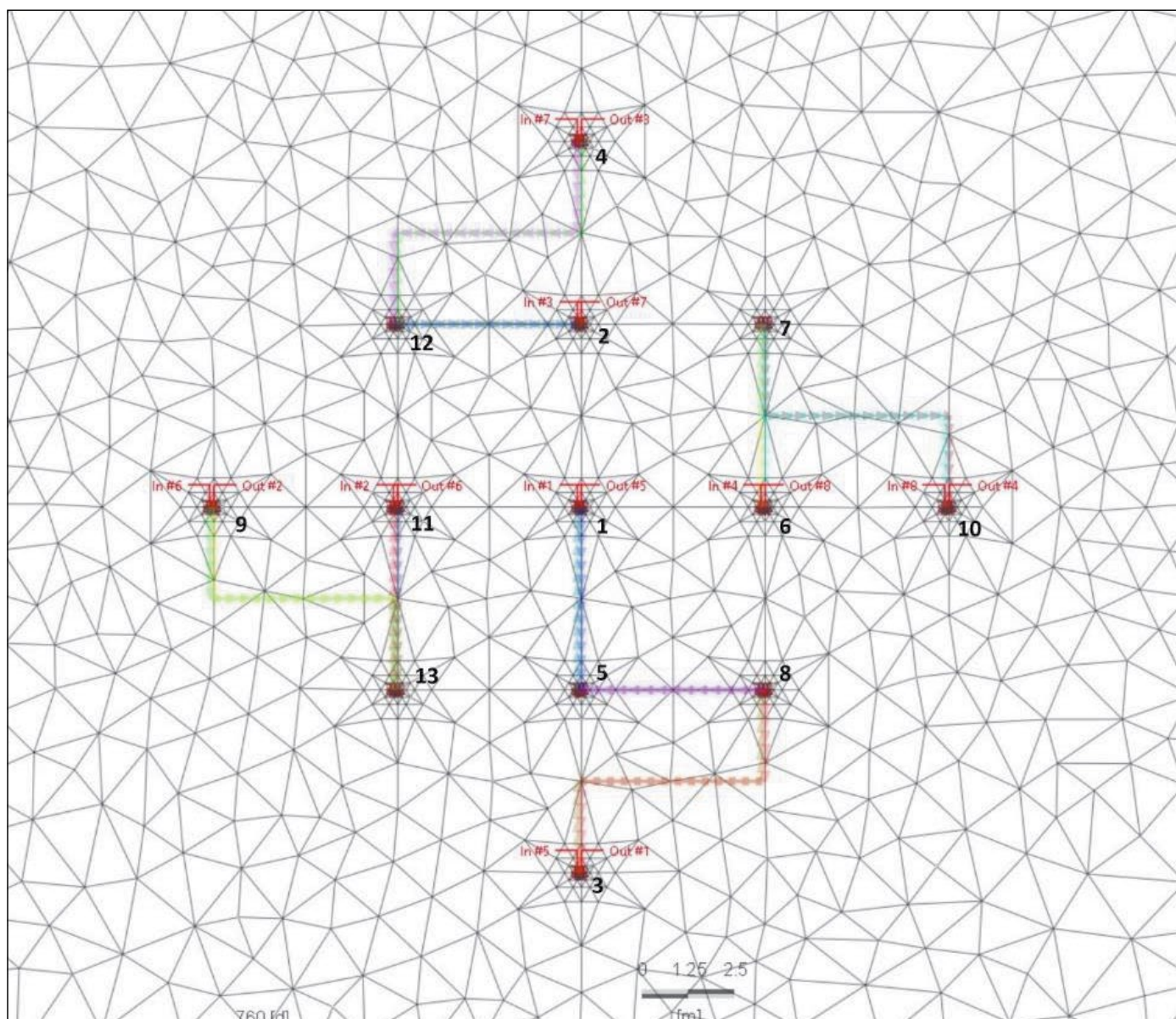
Rysunek 6. Położenie aktywnej części pojedynczego BHE w warstwach modelu (15–75 m)

Figure 6. Position of the active section of a single BHE within the model layers (15–75 m)

Tabela 2. Zestawienie głównych założeń modelu koncepcyjnego i planu eksploatacji

Table 2. Main assumptions of the conceptual model and operating schedule

Element modelu	Przyjęte założenie
Charakter badania	model koncepcyjno-numeryczny; brak przypisania do konkretnej lokalizacji
Domena	200 × 200 × 90 m; 11 warstw
Kompleks magazynujący	70 m; iłowiec albo nasycony wodą piaskowiec
Pole BHE	13 otworów; średnica 0,15 m; pojedyncza U-rurka; od 15 m do 75 m
Czynnik roboczy	woda; $\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$; $cp \approx 4,18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$
Temperatury	początkowa 10°C; ładowanie 70°C; odbiór 10°C
Strumień	40 m ³ /d
Harmonogram	730 dni ładowania + 8 cykli po 365 dni
Krok czasowy	1 dzień
Hydraulika	$i = 0$ albo $i = 0,0025$



Rysunek 7. Rozmieszczenie 13 BHE i ich połączenie w cztery obiegi szeregowe

Figure 7. Arrangement of 13 BHEs connected into four serial circuits

Wyniki symulacji

Łowiec bez przepływu wód podziemnych

W pierwszym wariancie przez 730 dni ładowano magazyn w łowcu przy zerowym gradiencie hydraulicznym, stosując krok czasowy 1 dzień. Rysunek 8 przedstawia rozwój osiowo zbliżonej do symetrycznej plamy cieplnej w dniach 10, 100, 200 i 730.

Rysunek 9 przedstawia temperaturę wody na wlocie i wylocie kolejnych BHE w szeregu BHE 11–BHE 13–BHE 9 podczas dwuletniego ładowania. Woda wpływała do BHE 11 z temperaturą 70°C, a następnie stopniowo oddawała ciepło w kolejnych wymiennikach.

Średnia temperatura wody opuszczającej BHE 9 wynosiła 65,94°C, co odpowiadało średniej różnicy temperatur 4,06 K

w tym szeregu. Dla całego pola średnia temperatura na wylocie wyniosła 67,82°C, czyli średnia różnica między wlotem i wylotem była równa 2,18 K. Chwilową moc cieplną obliczano z zależności (4):

$$Q_h = \rho c (T - T_0) Q \quad (4)$$

gdzie:

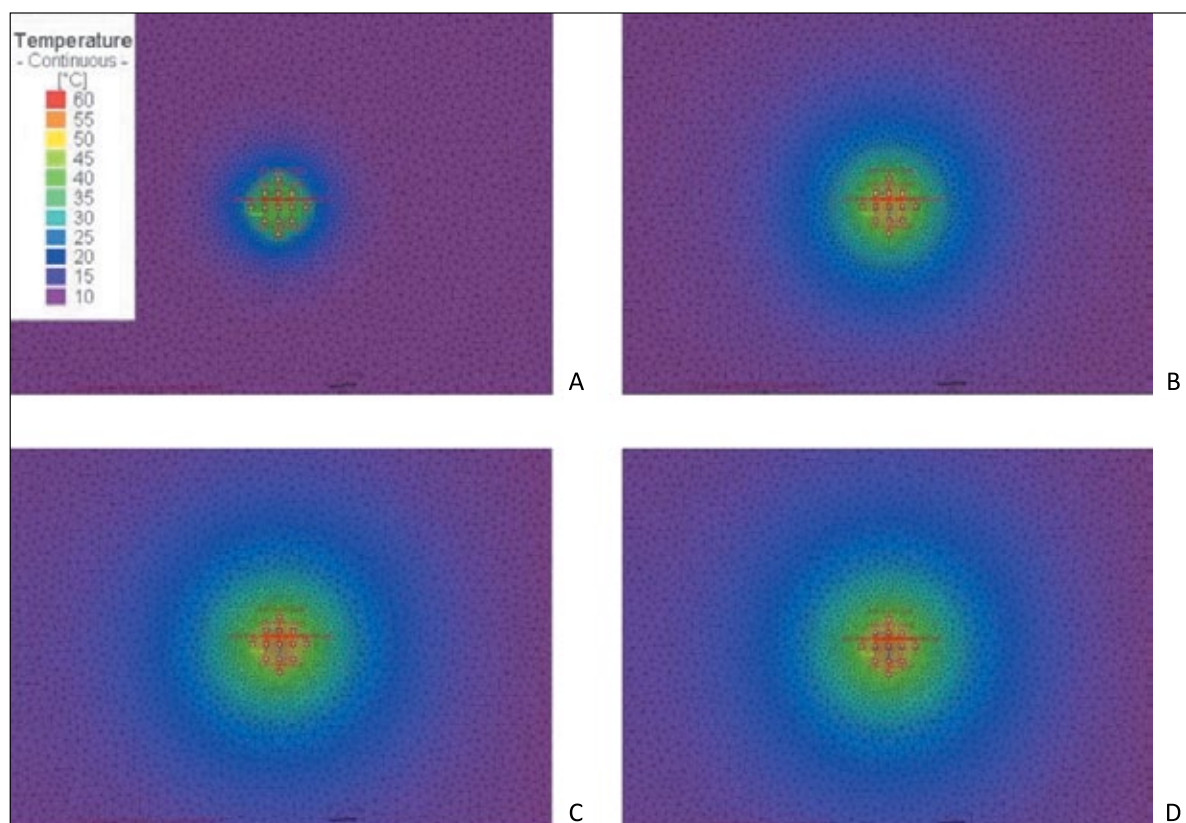
T – temperatura wody na wlocie [°C],

T_0 – temperatura wody na wylocie [°C],

ρc – objętościowa pojemność cieplna płynu [MJ/(m³·K)],

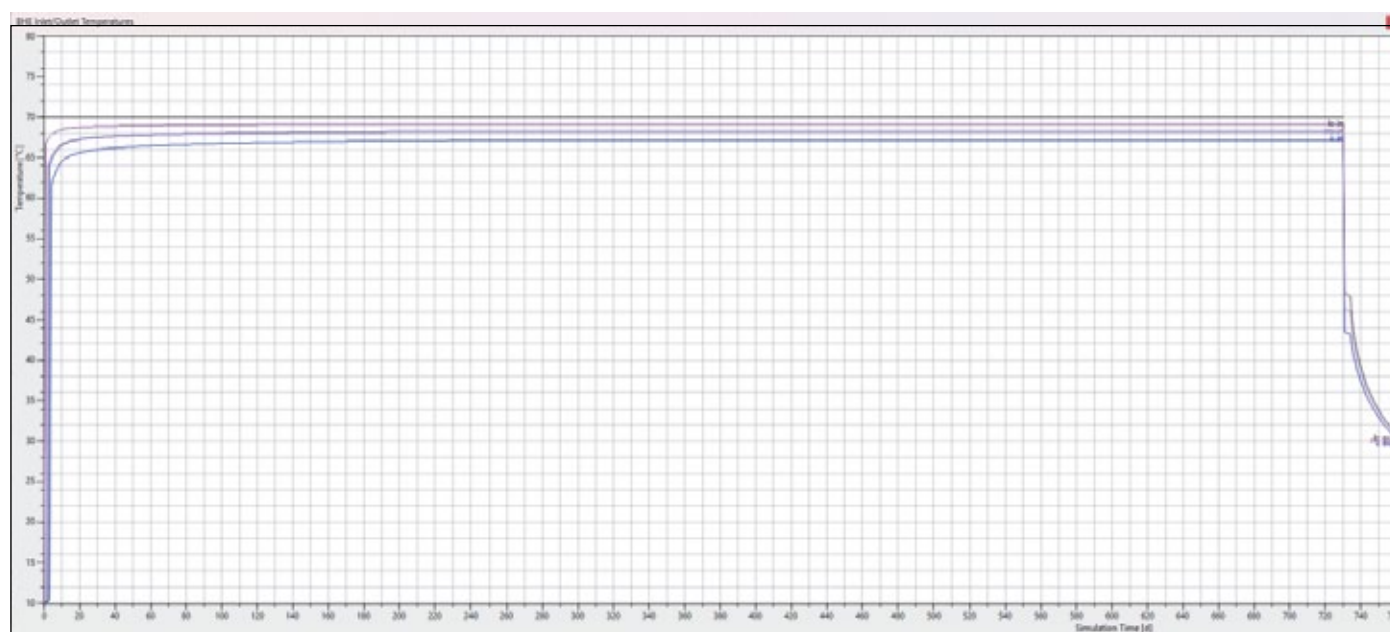
Q – strumień objętościowy [m³/d].

Chwilowa moc ładowania wynosiła początkowo około 55 kW, następnie malała wraz ze wzrostem temperatury strefy przyotworowej i po około 220 dniach stabilizowała się na poziomie około 23 kW. Wartości na wykresie *Heat Rate Budget*



Rysunek 8. Rozkład temperatury w iłowcu bez przepływu: A – dzień 10; B – dzień 100; C – dzień 200; D – dzień 730

Figure 8. Temperature distribution in mudstone without groundwater flow: A – day 10; B – day 100; C – day 200; D – day 730



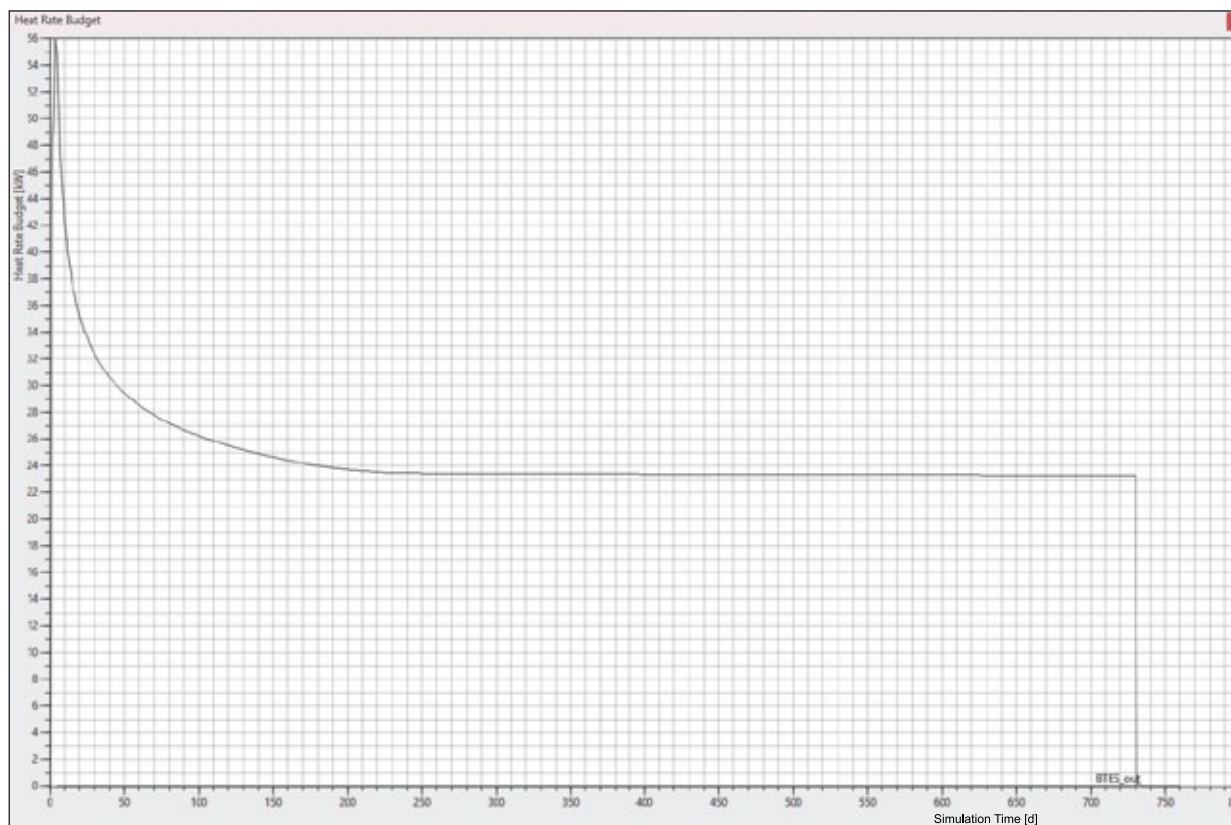
Rysunek 9. Temperatura wody na wlotach i wylotach szeregu BHE 11–BHE 13–BHE 9 podczas ładowania

Figure 9. Inlet and outlet water temperatures in the BHE 11-BHE 13-BHE 9 circuit during charging

są mocą chwilową; nie należy sumować ich bez uwzględnienia kroku czasowego. Energię wyznaczono przez całkowanie mocy w czasie w panelu *Heat Period Budget*.

W pierwszych 730 dniach do iłowca bez przepływu dostarczono 432,29 MWh energii (rysunek 11). Po 30 dniach

postoiu rozpoczęto osiem cykli odbioru i ponownego ładowania. Każdy okres odbioru i ładowania trwał 150 dni. Średnia temperatura wody na wylocie podczas odbioru wynosiła około 12,4°C. Zmiany temperatur w obiegach pokazano na rysunku 12, a rozkład temperatury w wybranych chwilach –



Rysunek 10. Chwilowa moc cieplna wymieniana przez wszystkie BHE podczas 730 dni ładowania

Figure 10. Instantaneous heat-transfer rate of all BHEs during the 730-day charging period



Rysunek 11. Skumulowana energia dostarczona podczas pierwszych 730 dni pracy

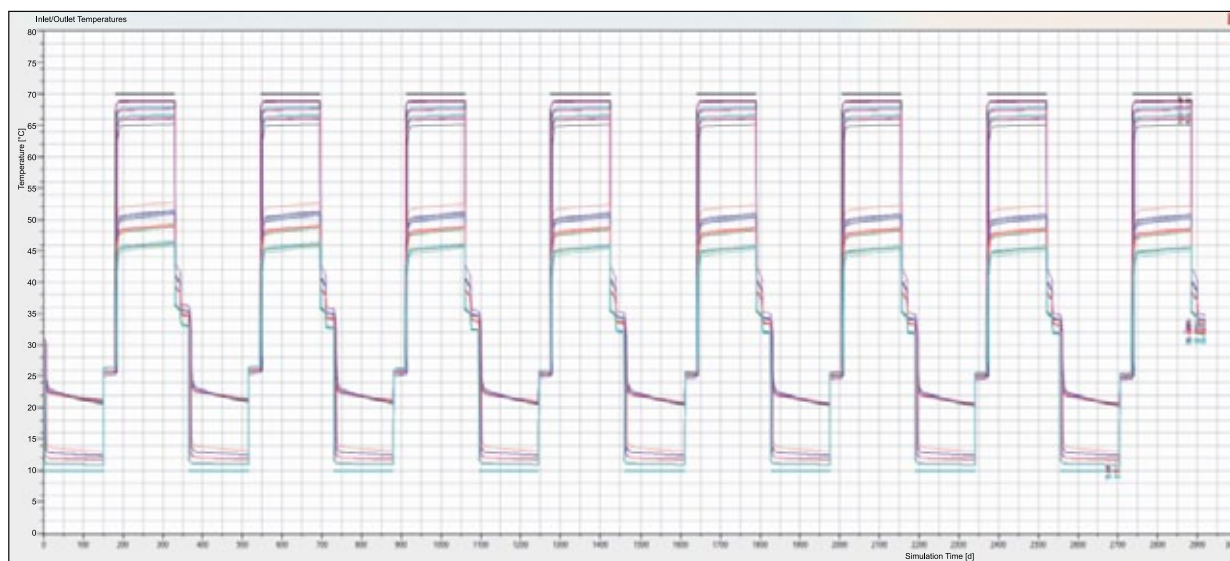
Figure 11. Cumulative energy supplied during the first 730 days of operation

na rysunku 13. Po dwuletnim ładowaniu chwilowa moc odbioru zmniejszała się w pierwszym cyklu z około 26 kW do 19 kW. W kolejnych cyklach zakres mocy odbioru wzrastał do około 20–29 kW. Po przełączeniu na ładowanie pojawiał się pik około 40,5 kW, po czym moc malała do około 32 kW.

Powtarzalność przebiegu wskazuje na stopniowe osiągnięcie cyklicznego stanu termicznego; energię cyklu oceniano z całej mocy, a nie z sumy wartości w kW.

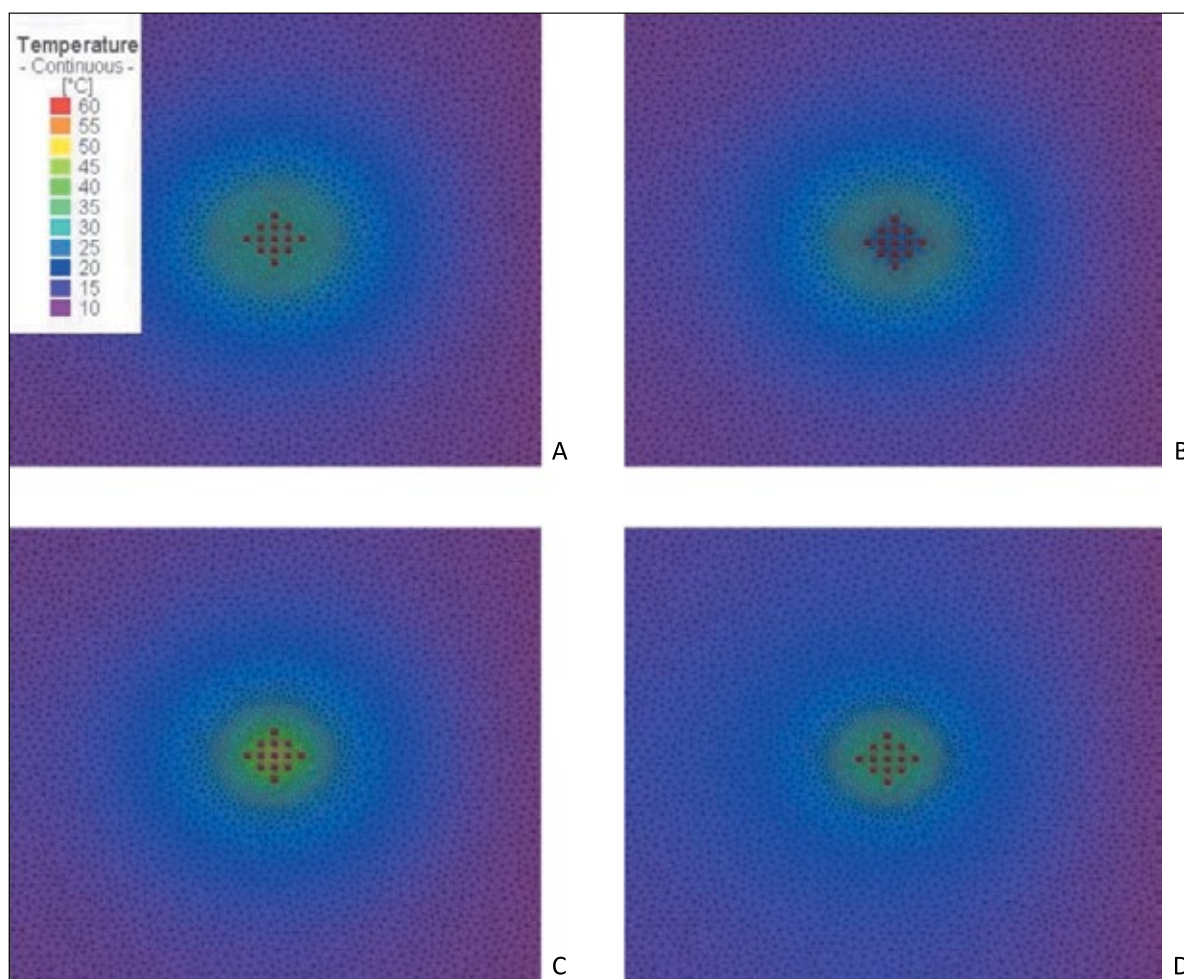
W ośmiu cyklach do magazynu dostarczono dodatkowo 959,64 MWh i odebrano 633,01 MWh.

Łączna energia dostarczona w całym okresie wyniosła 1391,93 MWh Współczynnik odzysku ciepłego, zdefiniowany jako $\eta = E_{odebrana}/E_{dostarczona} \cdot 100\%$, wyniósł 45,48%.



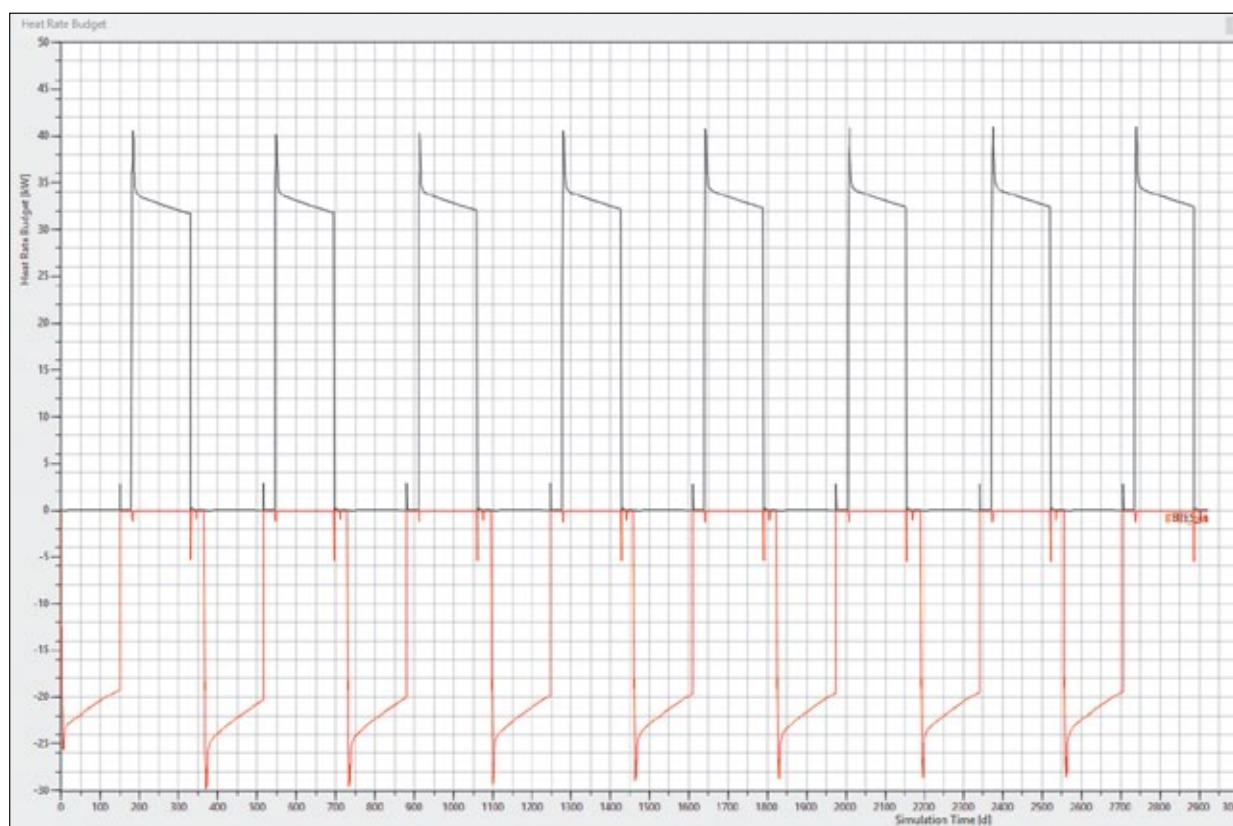
Rysunek 12. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE w ośmiu cyklach odbioru i ładowania

Figure 12. Inlet and outlet water temperatures of the BHEs during eight discharge and charging cycles



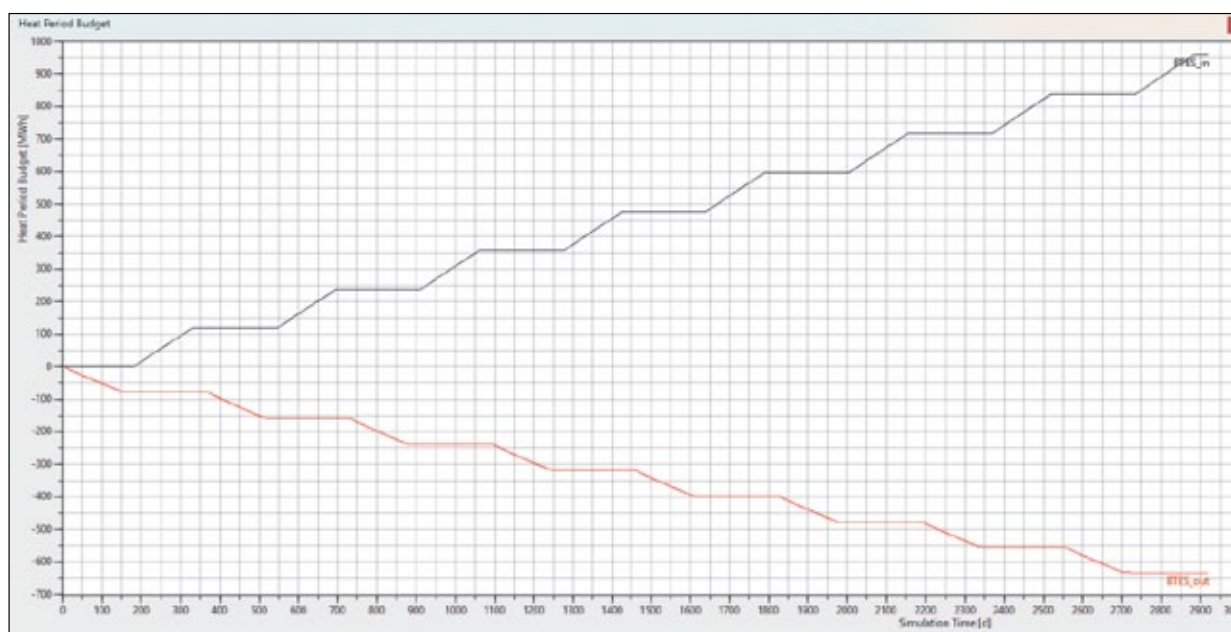
Rysunek 13. Rozkład temperatury: A – dzień 760; B – dzień 880; C – dzień 1060; D – dzień 3650

Figure 13. Temperature distribution: A – day 760; B – day 880; C – day 1060; D – day 3650



Rysunek 14. Bilans strumienia ciepła (*Heat Rate Budget*) w układzie BTES – moc chwilowa dla wszystkich odwiertów

Figure 14. Heat Rate Budget in the BTES system – instantaneous power for all boreholes



Rysunek 15. Skumulowana energia dostarczona (linia czarna) i odebrana (linia czerwona)

Figure 15. Cumulative supplied energy (black line) and recovered energy (red line)

Howieć przy przepływie wód podziemnych

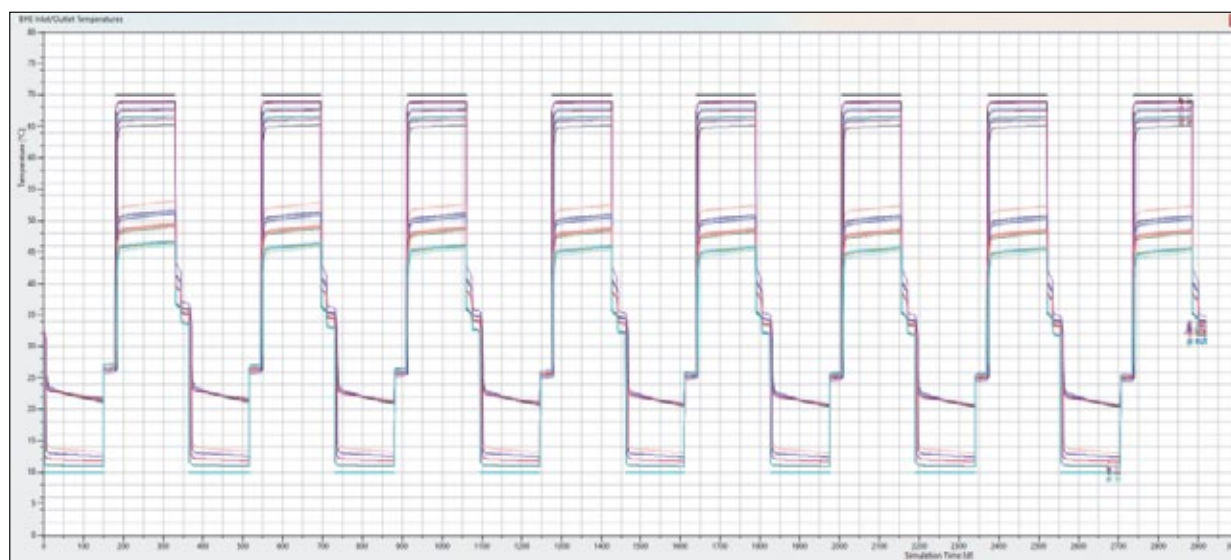
W drugim wariantcie zachowano parametry ilowca, lecz zadano spadek wysokości hydraulicznej 0,5 m na 200 m ($i = 0,0025$). Podczas pierwszych 730 dni średnia temperatura wody na wylocie wynosiła 65,94°C, a energia dostarczona

432,59 MWh, czyli praktycznie tyle samo co w wariantcie bez przepływu.

W ośmiu cyklach średnia temperatura wody na wylocie podczas odbioru wynosiła 12,39°C. Na mapach temperatury widoczne jest niewielkie przesunięcie plamy cieplnej zgodnie

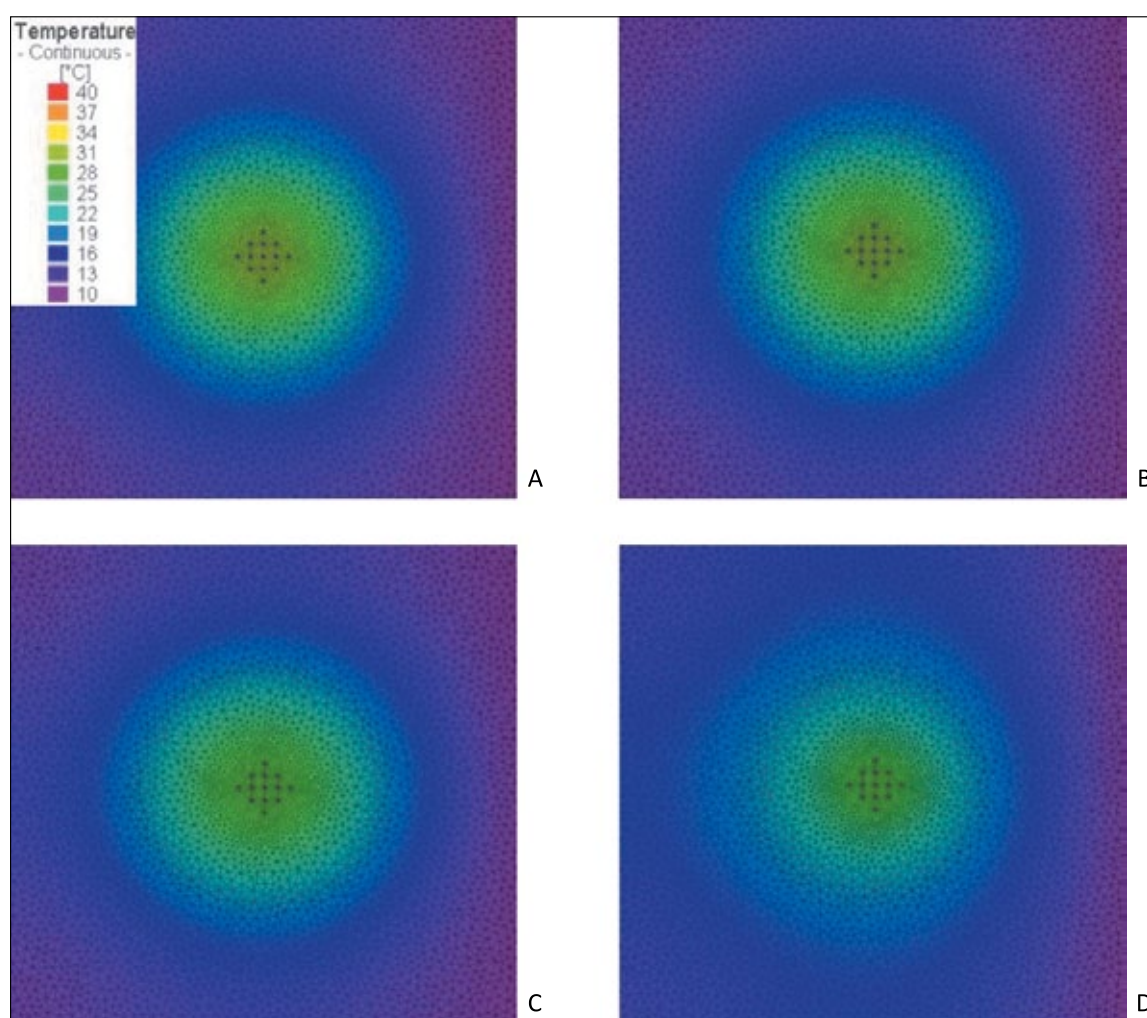
z kierunkiem przepływu. Mała skala tego efektu jest zgodna z niewielkim strumieniem Darcy'ego łożowca.

W cyklicznej części symulacji dostarczono 956,20 MWh i odebrano 641,21 MWh. Łącznie z etapem początkowym



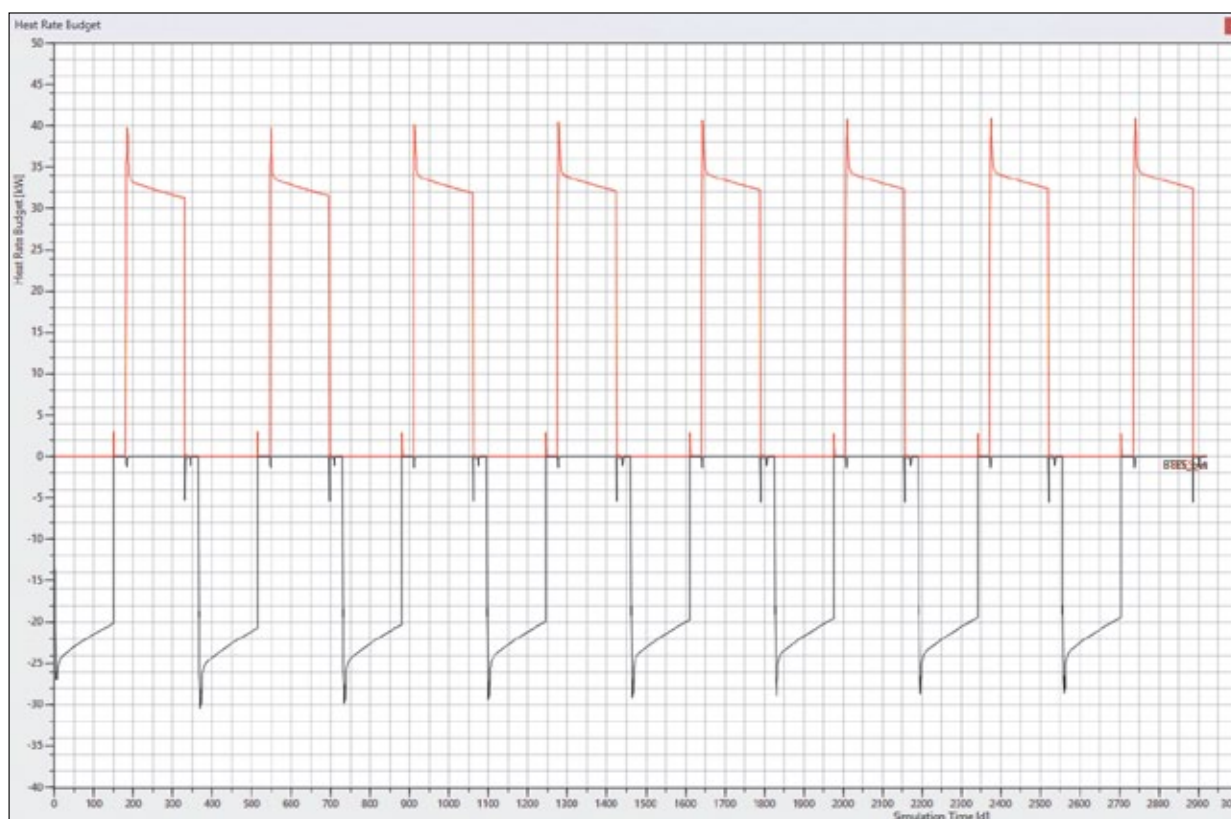
Rysunek 16. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE – wariant łożowcowy z przepływem

Figure 16. Inlet and outlet water temperatures of the BHEs - mudstone scenario with groundwater flow

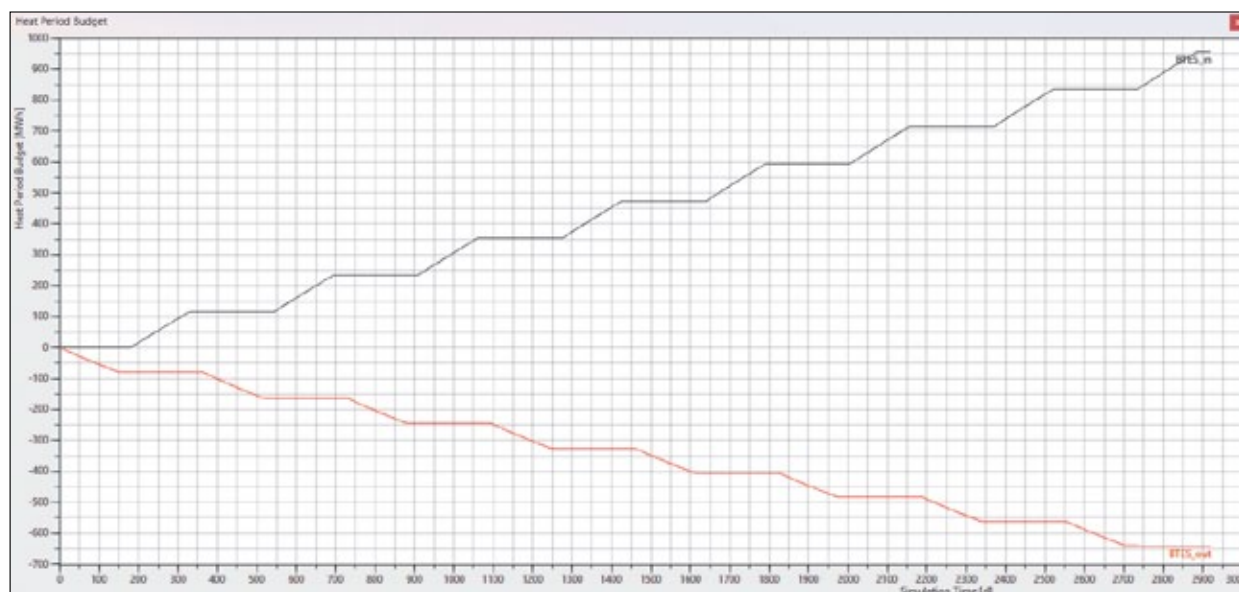


Rysunek 17. Rozkład temperatury w łożowcu z przepływem: A – dzień 760; B – dzień 880; C – dzień 1060; D – dzień 3650

Figure 17. Temperature distribution in mudstone with groundwater flow: A – day 760; B – day 880; C – day 1060; D – day 3650



Rysunek 18. Bilans strumienia ciepła (*Heat Rate Budget*) w układzie BTES – moc chwilowa dla wszystkich odwiertów
Figure 18. Heat Rate Budget in the BTES system — instantaneous power for all boreholes

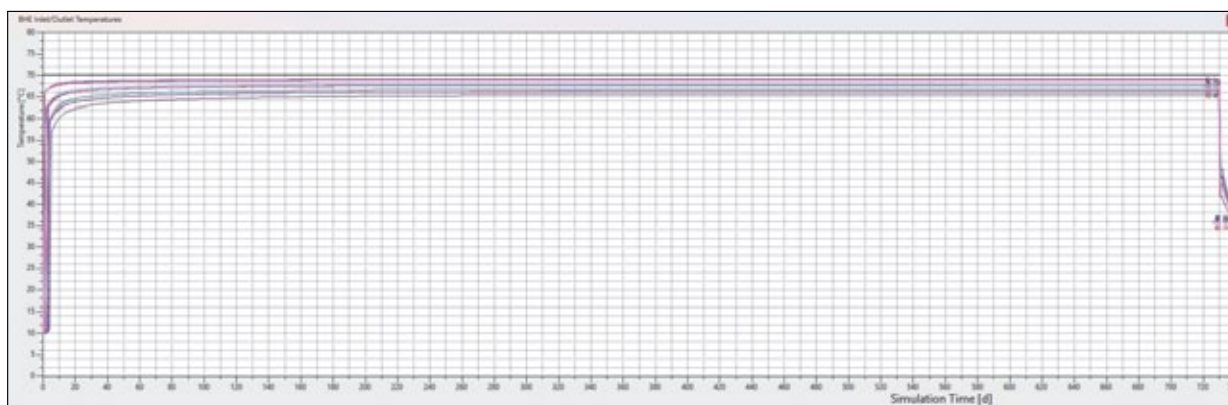


Rysunek 19. Skumulowana energia dostarczona (linia czarna) i odebrana (linia czerwona)
Figure 19. Cumulative supplied energy (black line) and recovered energy (red line)

energia dostarczona wyniosła 1388,79 MWh, a współczynnik odzysku 46,20%. Różnica 0,72 punktu procentowego względem wariantu bez przepływu jest niewielka i nie uzasadnia wniosku o trwałym korzystnym wpływie przepływu; może wynikać z kumulacji małych różnic numerycznych i warunków brzegowych.

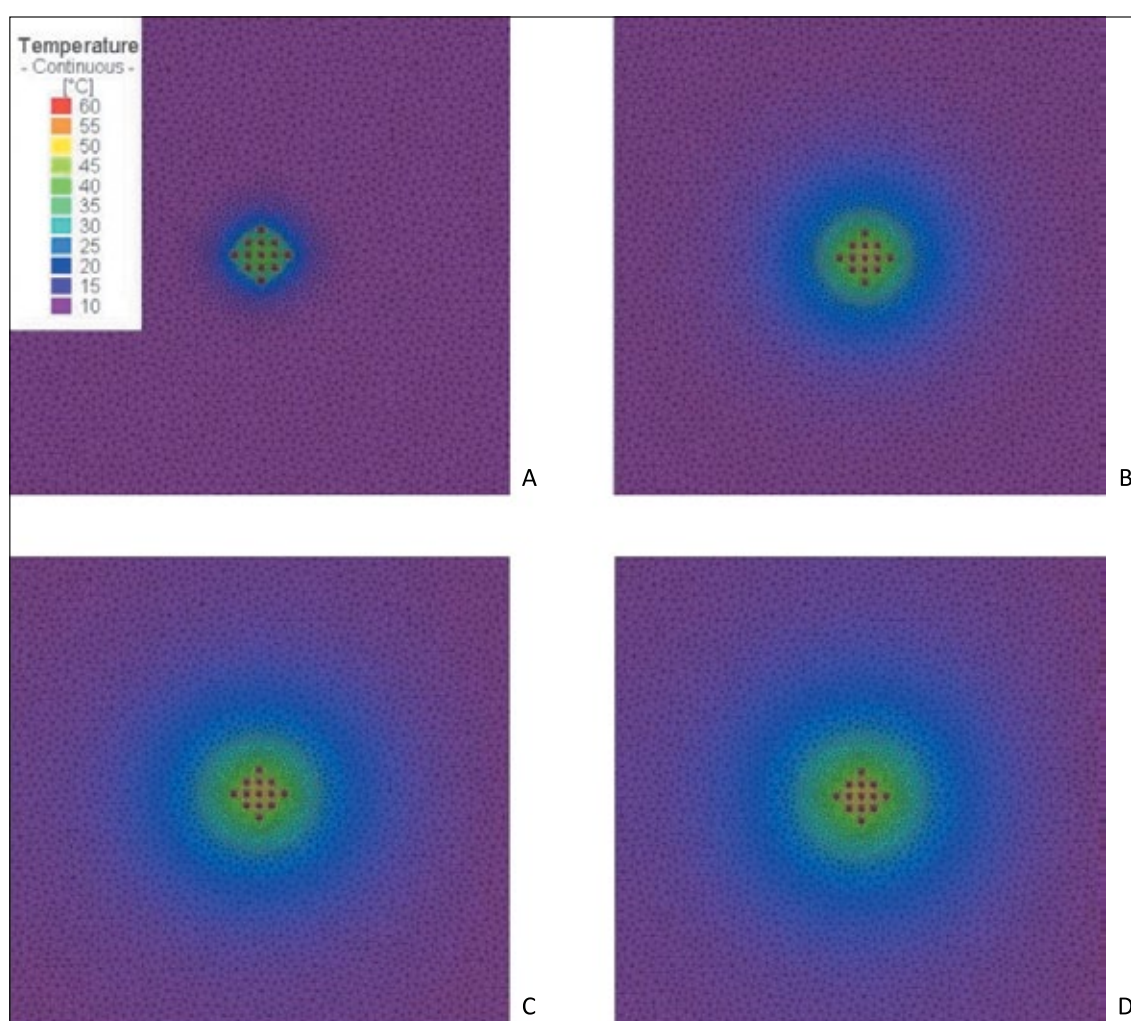
Piaskowiec bez przepływu wód podziemnych

W trzecim wariantie kompleks magazynujący zastąpiono nasyconym wodą piaskowcem o parametrach z tabeli 1, zachowując zerowy gradient hydrauliczny i pozostałe warunki eksploatacji. Podczas pierwszych 730 dni temperatura na wlocie wynosiła 70°C, a średnia temperatura na wylocie około 67°C.



Rysunek 20. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE podczas ładowania piaskowca bez przepływu

Figure 20. Inlet and outlet water temperatures of the BHEs during charging of sandstone without groundwater flow



Rysunek 21. Rozkład temperatury w piaskowcu bez przepływu: A – dzień 10; B – dzień 100; C – dzień 200; D – dzień 730

Figure 21. Temperature distribution in sandstone without groundwater flow: A – day 10; B – day 100; C – day 200; D – day 730

Rozkład temperatury przedstawiono na rysunku 21. Chwilowa moc ładowania wynosiła początkowo około 78 kW, szybko zmniejszyła się do około 55 kW, a po około 260 dniach stabilizowała się na poziomie około 32,5 kW. Całka z przebiegu mocy odpowiada energii 602,21 MWh dostarczonej w pierwszych 730 dniach (rysunki 22 i 23).

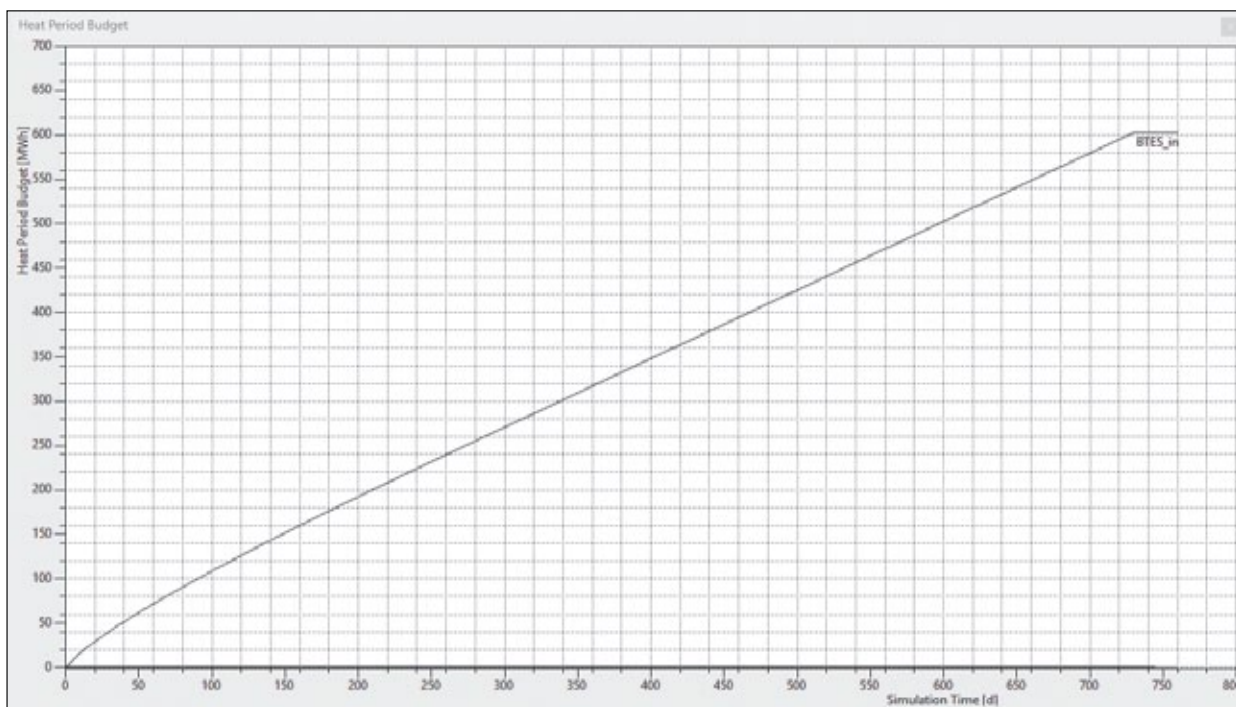
W ośmiu kolejnych cyklach średnia temperatura wody na wylocie podczas odbioru wynosiła 13,13°C. Rozkład temperatury w wybranych chwilach przedstawiono na rysunku 25. W pierwszym cyklu moc odbioru zmniejszała się z około 35 kW do 29 kW, a w kolejnych cyklach osiągała zakres około 32–44 kW.

Podczas ładowania początkowy pik wynosił około 50 kW i malał do 44 kW. W części cyklicznej dostarczono 1313,31 MWh, a łącznie 1915,52 MWh. Odebrano 989,28 MWh, co odpowiada współczynnikowi odzysku 51,65%.



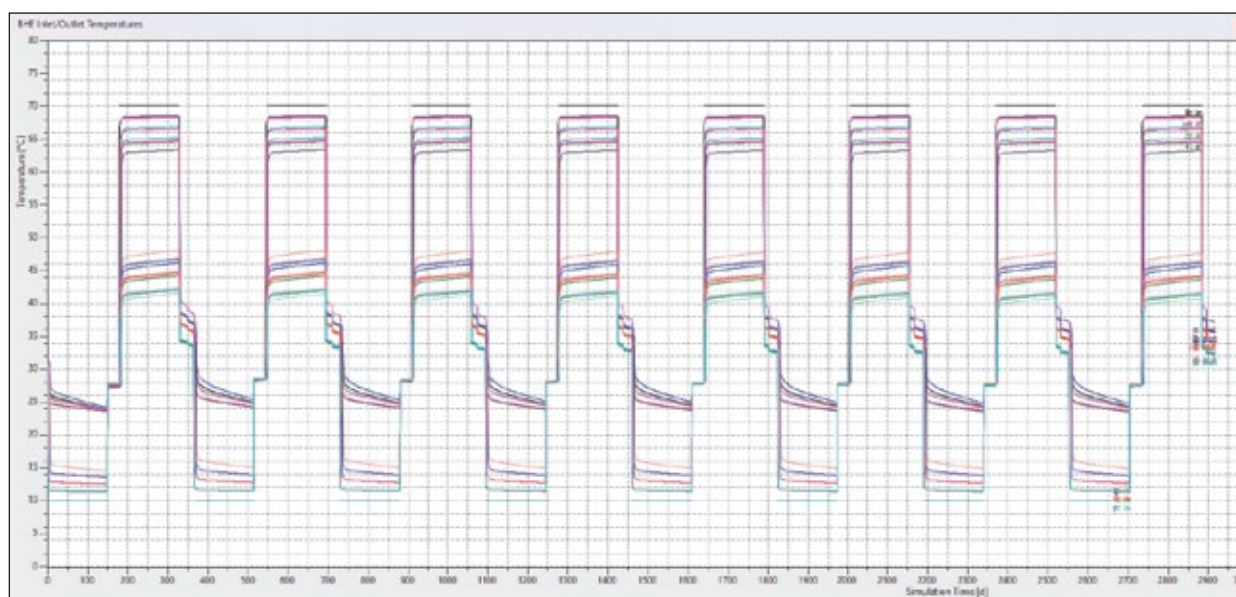
Rysunek 22. Chwilowa moc cieplna wszystkich BHE podczas 730 dni ładowania piaskowca bez przepływu

Figure 22. Heat Rate Budget in the BTES system – instantaneous power for all boreholes during a 2-year charging period



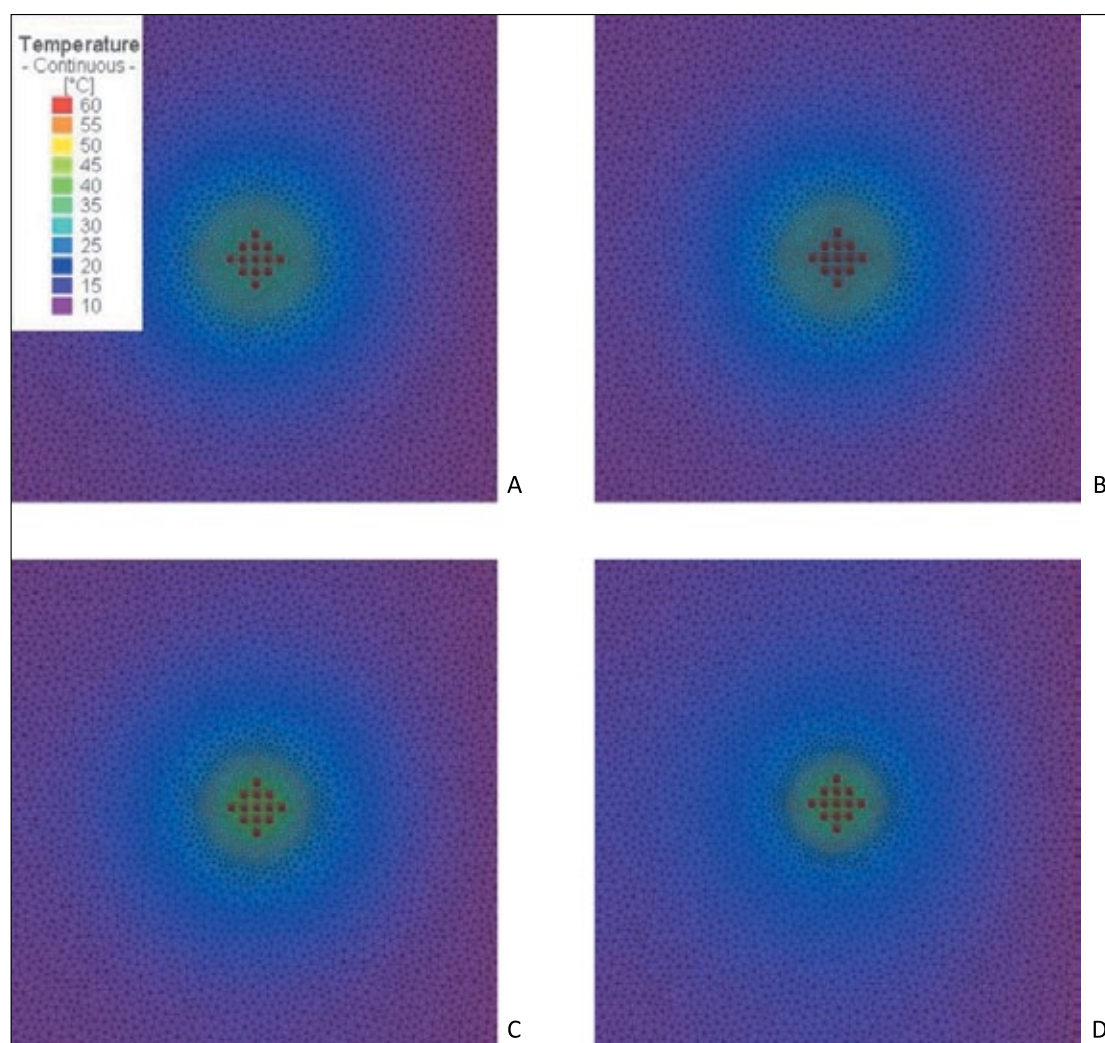
Rysunek 23. Skumulowana energia dostarczona podczas pierwszych 730 dni pracy

Figure 23. Heat Period Budget in the BTES system during the first two years of operation



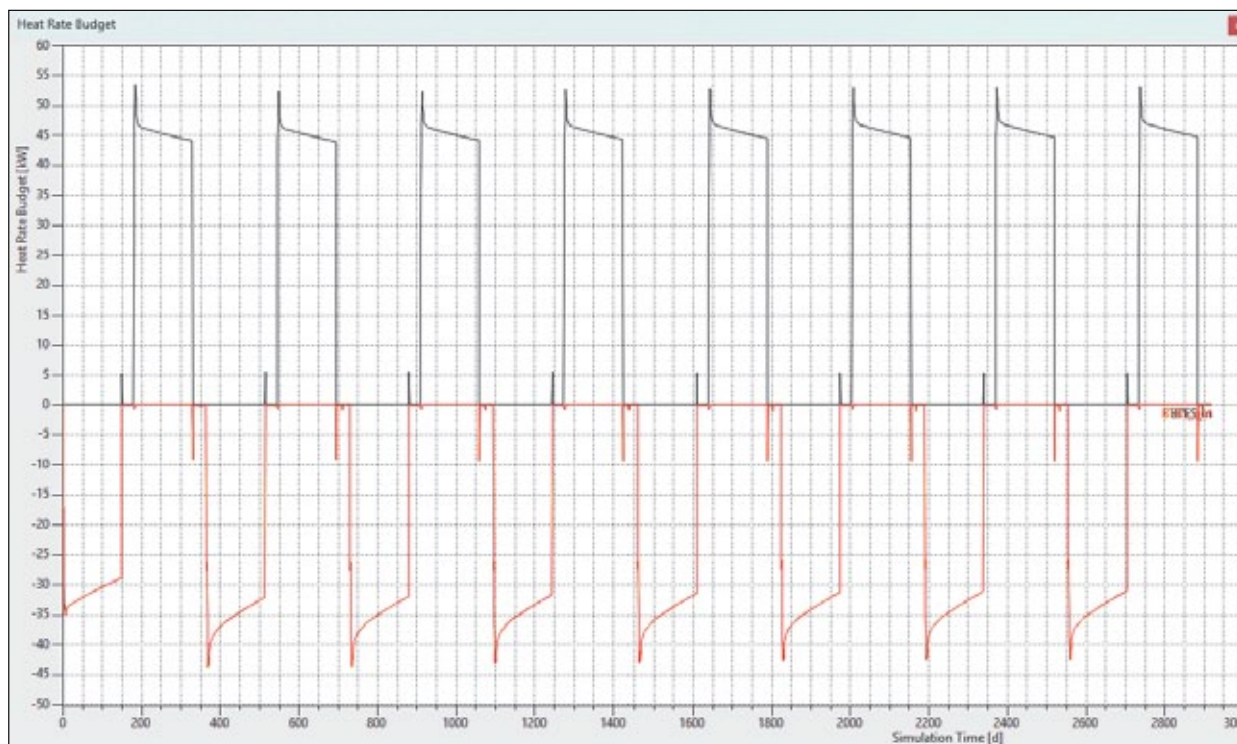
Rysunek 24. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE – piaskowiec bez przepływu

Figure 24. Inlet and outlet water temperatures of the BHEs – sandstone without groundwater flow



Rysunek 25. Rozkład temperatury w piaskowcu bez przepływu: A – dzień 760; B – dzień 880; C – dzień 1060; D – dzień 3650

Figure 25. Temperature distribution in sandstone without groundwater flow: A – day 760; B – day 880; C – day 1060; D – day 3650



Rysunek 26. Bilans strumienia ciepła (*Heat Rate Budget*) w układzie BTES – moc chwilowa dla wszystkich odwiertów

Figure 26. Heat Rate Budget in the BTES system – instantaneous power for all boreholes



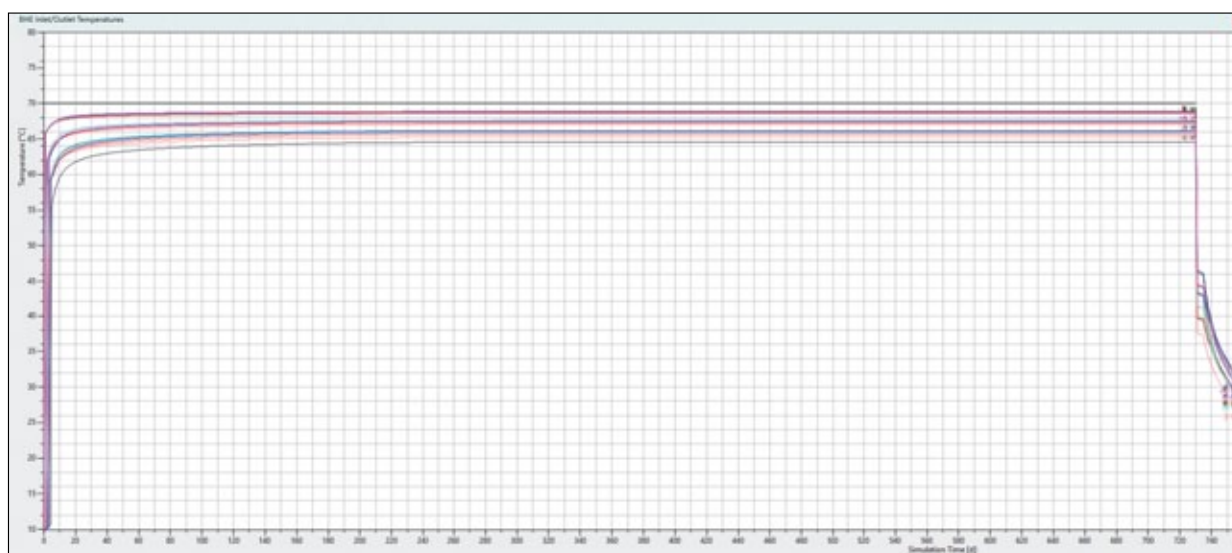
Rysunek 27. Skumulowana energia dostarczona (linia czarna) i odebrana (linia czerwona)

Figure 27. Cumulative supplied energy (black line) and recovered energy (red line)

Piaskowiec przy przepływie wód podziemnych

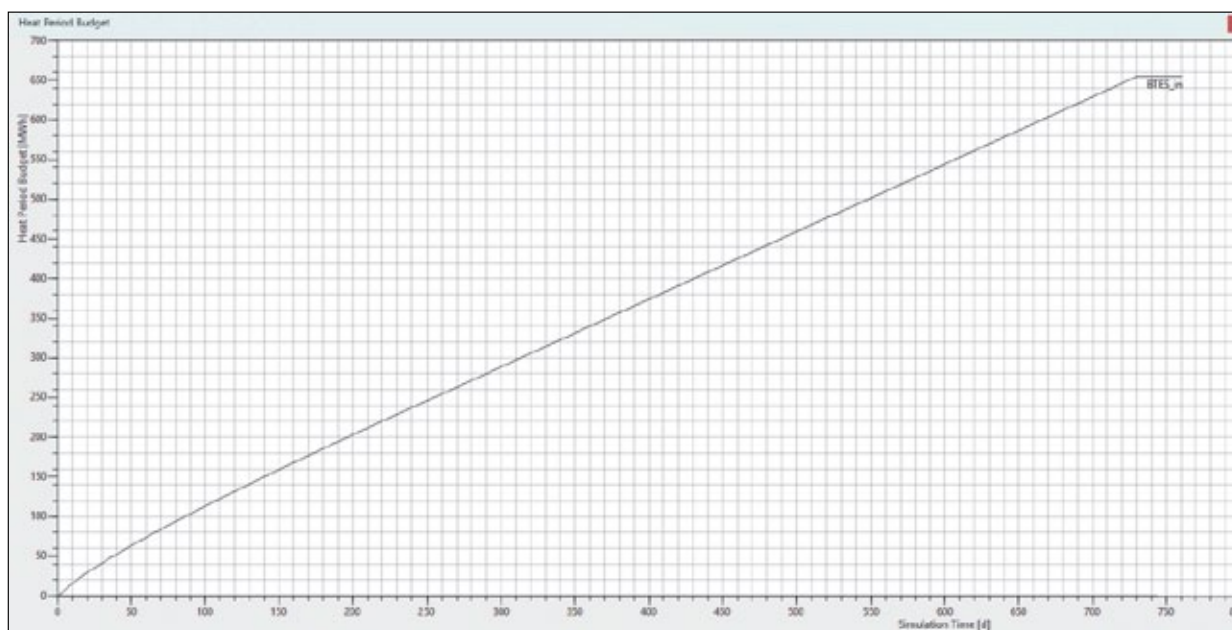
W czwartym wariancie dla piaskowca zadano gradient hydrauliczny $i = 0,0025$. Podczas pierwszych 730 dni średnia temperatura wody na wylocie wynosiła $65,61^{\circ}\text{C}$, a energia dostarczona $655,22 \text{ MWh}$, czyli o $53,01 \text{ MWh}$ więcej niż bez

przepływu. Większa moc ładowania wynika z dopływu wody o temperaturze 10°C , która zwiększa lokalny gradient temperatury i odbiera ciepło ze strefy BHE. Jednocześnie plama cieplna wyraźnie przemieszczała się zgodnie z kierunkiem spadku hydraulicznego, co pokazuje rysunek 30.



Rysunek 28. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE podczas ładowania piaskowca z przepływem

Figure 28. Graph showing changes in the temperature entering and leaving BTES boreholes



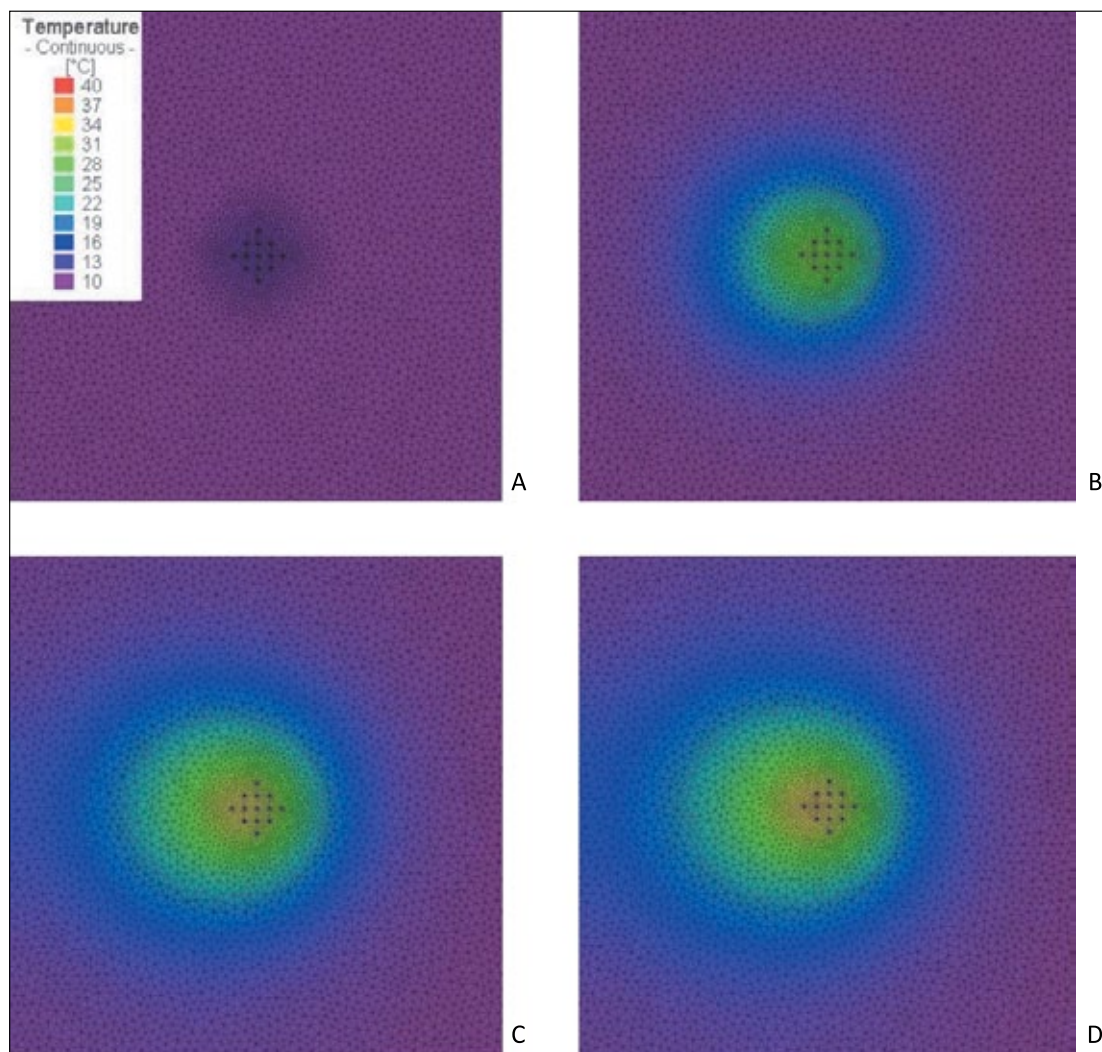
Rysunek 29. Skumulowana energia dostarczona podczas pierwszych 730 dni pracy

Figure 29. Heat Period Budget in the BTES system during the first two years of operation

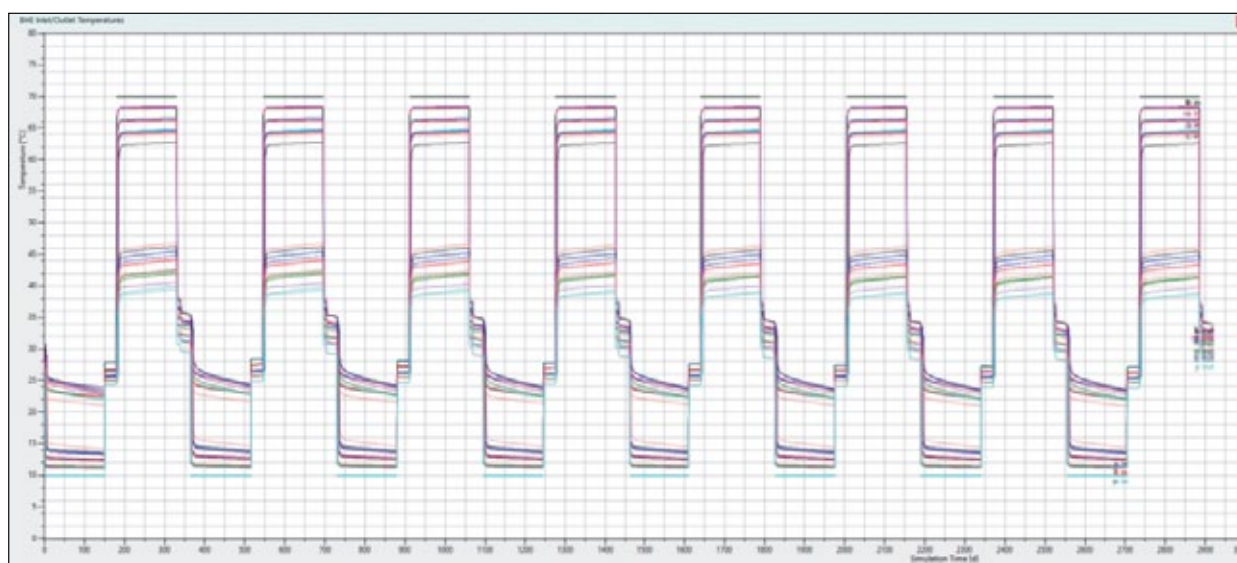
W części cyklicznej średnia temperatura wody na wylocie podczas odbioru wynosiła 13,44°C. Rysunek 32 pokazuje dalsze przesuwanie plamy cieplnej poza centralną strefę pola BHE, co ogranicza możliwość późniejszego odzyskania części energii.

W pierwszym okresie odbioru moc zmniejszała się z około 32 kW do 27 kW, a w kolejnych cyklach mieściła

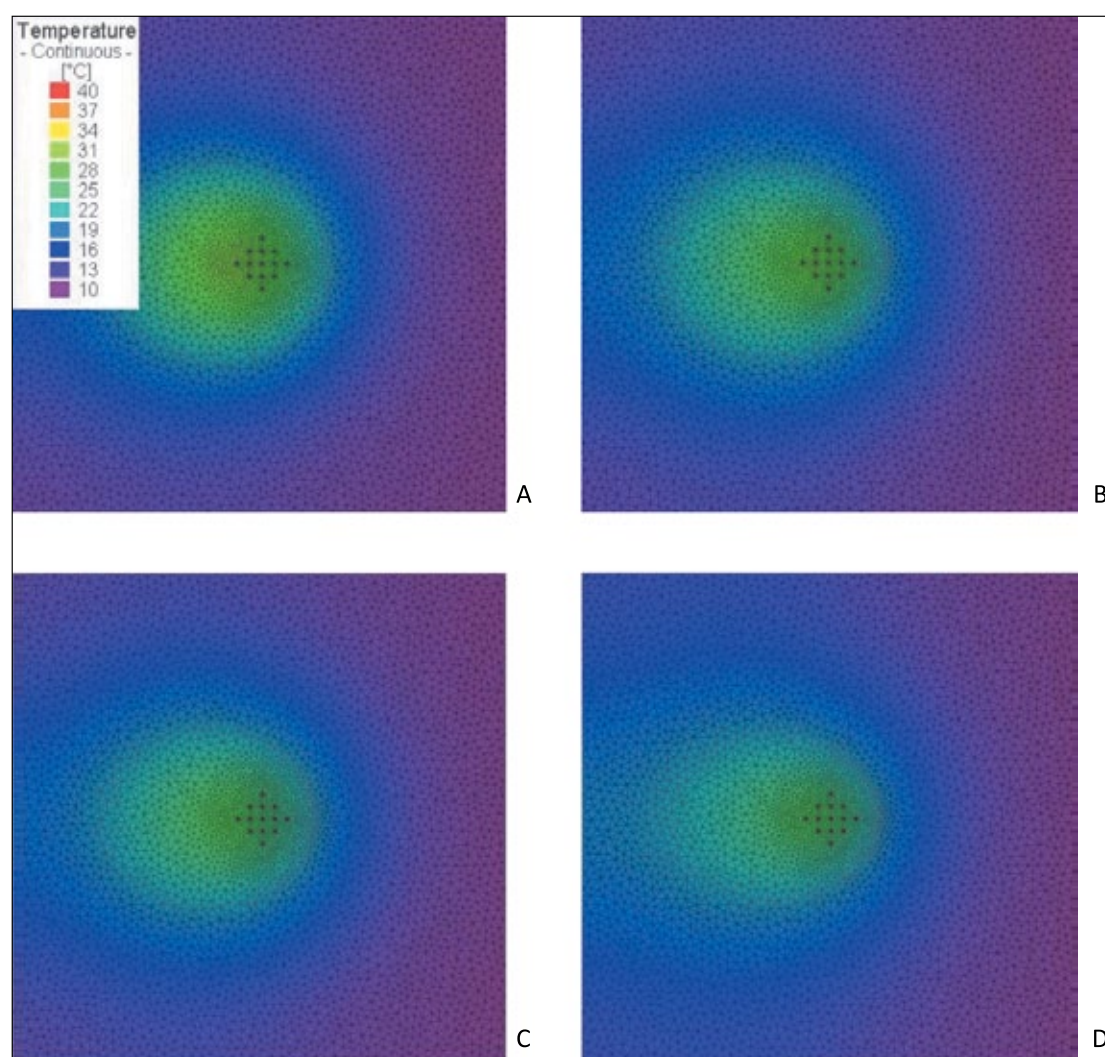
się w zakresie około 30–41 kW. Podczas ładowania moc zmniejszała się z około 57 kW do 47 kW. W części cyklicznej dostarczono 1413,08 MWh, a łącznie 2068,30 MWh. Odebrano 927,54 MWh, co odpowiada współczynnikowi odzysku 44,85%.



Rysunek 30. Rozkład temperatury w piaskowcu z przepływem: A – dzień 10; B – dzień 100; C – dzień 200; D – dzień 730
Figure 30. Temperature distribution in sandstone with groundwater flow: A – day 10; B – day 100; C – day 200; D – day 730

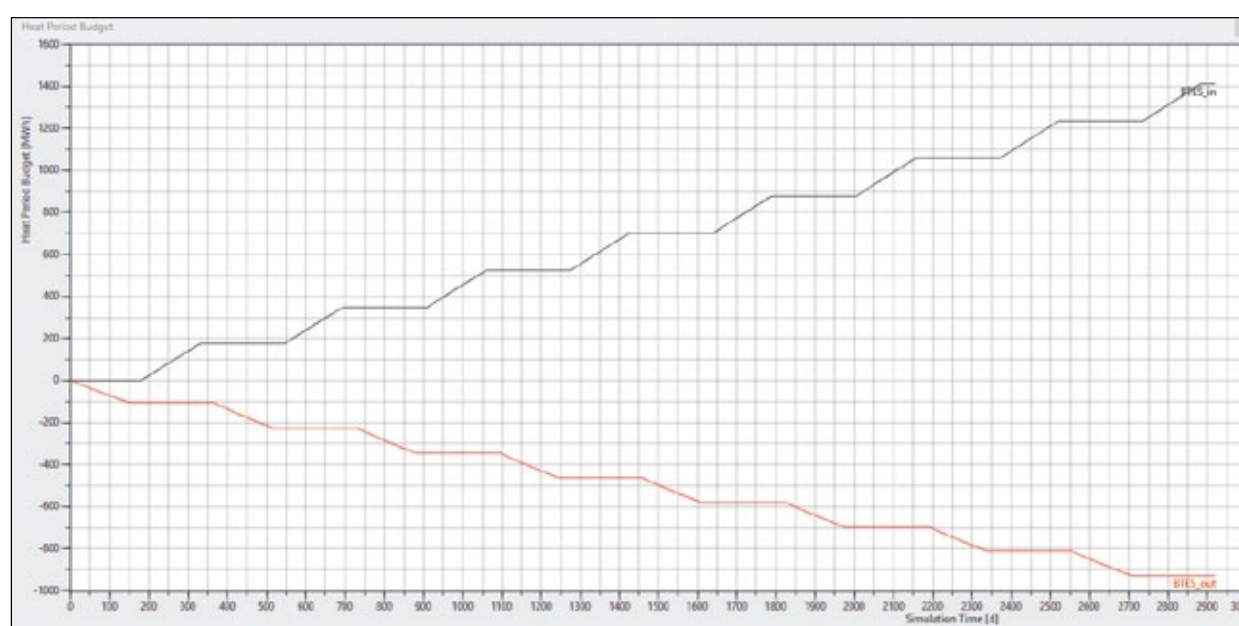


Rysunek 31. Temperatura wody na wlotach i wylotach BHE – piaskowiec z przepływem
Figure 31. Graph showing changes in the temperature entering and leaving BTES boreholes



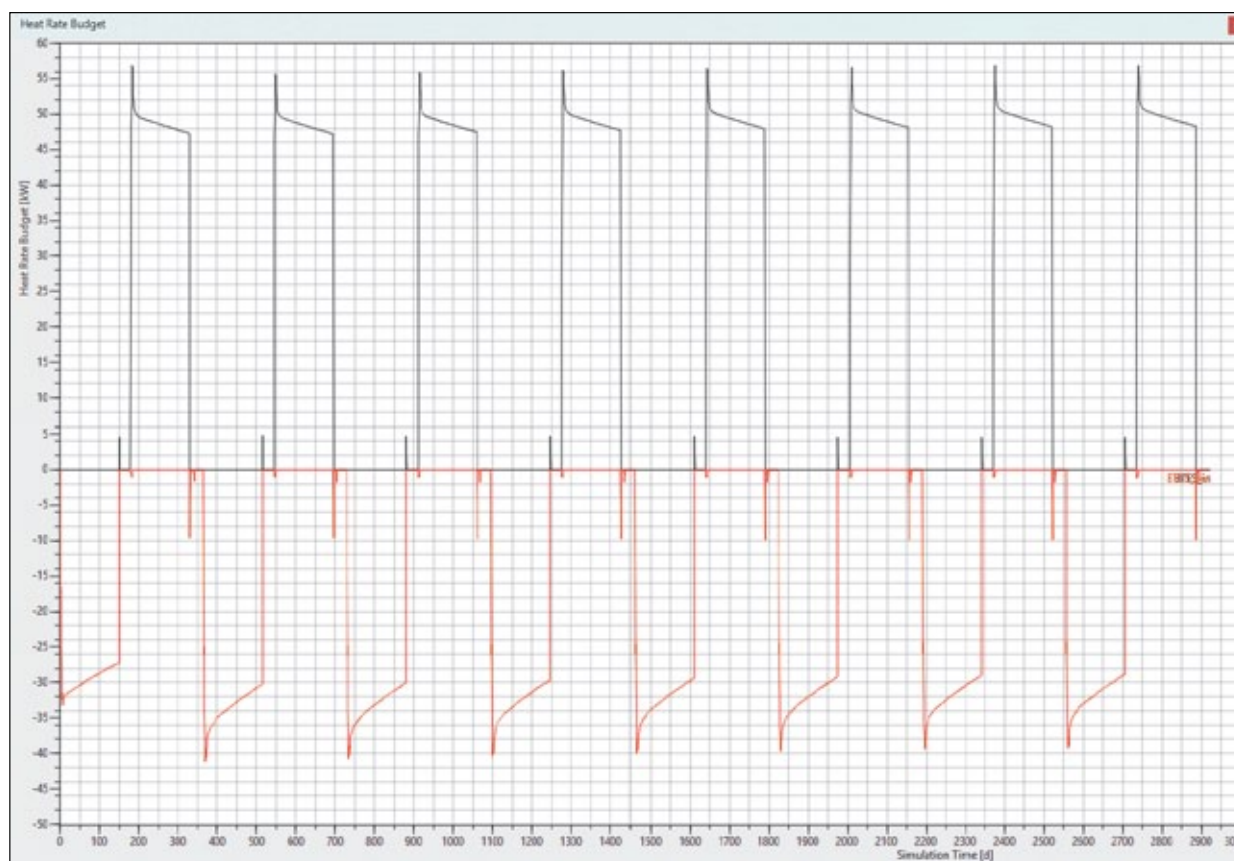
Rysunek 32. Rozkład temperatury w piaskowcu z przepływem: A – dzień 760; B – dzień 880; C – dzień 1060; D – dzień 3650

Figure 32. Temperature distribution in sandstone with groundwater flow: A – day 760; B – day 880; C – day 1060; D – day 3650



Rysunek 33. Skumulowana energia dostarczona (linia czarna) i odebrana (linia czerwona)

Figure 33. Cumulative supplied energy (black line) and recovered energy (red line)



Rysunek 34. Bilans strumienia ciepła (*Heat Rate Budget*) w układzie BTES – moc chwilowa dla wszystkich odwiertów

Figure 34. Heat Rate Budget in the BTES system – instantaneous power for all boreholes

Dyskusja wyników

Wyniki wszystkich wariantów zestawiono w tabeli 3. Współczynnik odzysku η jest stosunkiem skumulowanej energii odebranej do skumulowanej energii dostarczonej w całym dziesięcioletnim okresie symulacji. Nie jest on współczynnikiem COP pompy ciepła ani sprawnością całego systemu, ponieważ model nie uwzględnia energii elektrycznej pomp, strat w instalacji napowierzchniowej ani sposobu wykorzystania ciepła po stronie odbiorcy.

W warunkach bez przepływu piaskowiec przyjął o około 38% więcej energii niż łowiec, a jego współczynnik odzysku był wyższy o 6,17 punktu procentowego. Wynika to przede wszystkim z przyjętej większej przewodności cieplnej

(3,7 wobec 2,25 W/(m·K)) i większej objętościowej pojemności cieplnej (4,69 wobec 2,3 MJ/(m³·K)). Parametry te zwiększają szybkość rozpraszania ciepła od BHE i ilość energii akumulowanej w dostępnej objętości ośrodka. Jest to wynik modelowy zależny od przyjętych wartości, dlatego nie można go uogólniać na wszystkie piaskowce i łowce bez pomiarów laboratoryjnych i terenowych.

W łowcu wpływ przepływu był niewielki. Dla gradientu $i = 0,0025$ orientacyjna prędkość porowa wynosiła około 0,0036 m/d, dlatego w czasie pojedynczego cyklu rocznego przemieszczenie adwekcyjne było małe w porównaniu z wymiarami pola. Wzrost η z 45,48% do 46,20% jest mniejszy niż 1 punkt procentowy i nie powinien być interpretowany jako potwierdzony efekt korzystny. Pierwotne wyjaśnienie

Tabela 3. Porównanie bilansu energetycznego czterech wariantów

Table 3. Comparison of the energy balance for the four scenarios

Ośrodek	Gradient i	E dostarczona [MWh]	E odebrana [MWh]	η [%]
Łowiec	0	1391,93	633,01	45,48
Łowiec	0,0025	1388,79	641,21	46,20
Piaskowiec	0	1915,52	989,28	51,65
Piaskowiec	0,0025	2068,30	927,54	44,85

o dopływie „cieplejszej wody” było niezasadne, ponieważ temperatura wody na granicy dopływu wynosiła 10°C, a więc była niższa od temperatury nagrzanej strefy.

W piaskowcu orientacyjna prędkość porowa wynosiła około 0,0216 m/d. Dopływ chłodnej wody zwiększał różnicę temperatur w fazie ładowania, dlatego do modelu można było dostarczyć więcej energii. Jednocześnie adwekcja przesuwiała nagrzaną wodę i plamę cieplną poza obszar obsługiwany przez BHE, przez co energia odebrana zmalała, a η obniżyła się z 51,65% do 44,85%. Literatura potwierdza, że przepływ wód podziemnych może zwiększać chwilową wymianę ciepła pojedynczych BHE, lecz w przypadku magazynowania sezonowego kierunek efektu zależy od tego, czy przemieszczona energia pozostaje w zasięgu późniejszego odbioru (Piipponen i in., 2024; Asan i in., 2025).

Najważniejsze ograniczenia analizy to:

- brak kalibracji dla rzeczywistej lokalizacji,
- jednorodne parametry w obrębie kompleksów,
- stałe właściwości termiczne,
- brak analizy niepewności i wrażliwości,
- uproszczona reprezentacja parametrów rur i wypełnienia BHE,
- dzienny krok czasowy
- nieuwzględnienie strat i zużycia energii w części napowierzchniowej.

Przed wykorzystaniem modelu do projektu inwestycyjnego konieczne są co najmniej badania parametrów skał i wód, test reakcji termicznej TRT, kalibracja na danych temperaturowych, analiza siatki i kroku czasowego oraz wariantowanie geometrii i hydrauliki pola BHE.

Podsumowanie i wnioski

W pracy wykonano koncepcyjno-numeryczną analizę czterech wariantów tego samego pola BTES, różniących się właściwościami kompleksu magazynującego oraz obecnością gradientu hydraulicznego. Na podstawie obliczeń sformułowano następujące wnioski:

- w przypadku iłowca bez przepływu dostarczono 1391,93 MWh i odebrano 633,01 MWh, uzyskując współczynnik odzysku 45,48%;
- w przypadku iłowca z gradientem $i = 0,0025$ dostarczono 1388,79 MWh i odebrano 641,21 MWh, a współczynnik odzysku wyniósł 46,20%; różnica 0,72 punktu procentowego jest zbyt mała, aby wykazać korzystny wpływ przepływu;
- w przypadku piaskowca bez przepływu dostarczono 1915,52 MWh i odebrano 989,28 MWh, uzyskując najwyższy współczynnik odzysku 51,65%;

- w przypadku piaskowca z gradientem $i = 0,0025$ dostarczono 2068,30 MWh i odebrano 927,54 MWh, a współczynnik odzysku zmalał do 44,85%;
- większa przewodność i objętościowa pojemność cieplna przyjęta dla piaskowca umożliwiły dostarczenie około 38% więcej energii niż w iłowcu w wariantach bez przepływu;
- w iłowcu transport adwekcyjny był słaby, dlatego wpływ gradientu hydraulicznego na bilans cieplny okazał się pomijalnie mały w skali analizowanego modelu;
- w piaskowcu adwekcja zwiększała zdolność przyjmowania ciepła podczas ładowania, ale jednocześnie przemieszczała energię poza strefę skutecznego odbioru, co obniżyło odzysk o około 6,8 punktu procentowego;
- FEFLOW jest przydatnym narzędziem do analizy sprzężonego przepływu i transportu ciepła w systemach BTES, jednak wyniki modelu koncepcyjnego nie mogą zastąpić kalibracji, walidacji i analizy niepewności wymaganych dla konkretnej lokalizacji.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Numeryczne modelowanie magazynowania ciepła w strukturach geologicznych z wykorzystaniem technologii BTES* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlecenia: 28/KP/2025, nr archiwalny: DK-4100-6-2025-02.

Literatura

- Asan E., Ozturk Z.F., Abali B.E., Sisman A., 2025. Groundwater flow impacts on very high temperature borehole thermal energy storage performance. *Energy and Buildings*, 349: 116568. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116568.
- Bear J., Bachmat Y., 1986. Macroscopic modelling of transport phenomena in porous media: The continuum approach. *Transport in Porous Media*, 1, 213–240. DOI: 10.1007/BF00238181.
- DHI, 2024. FEFLOW 8.0 Documentation – Heat parameters. Dokumentacja online, DHI A/S. https://download.feflow.com/html/help80/feflow/09_Parameters/Material_Properties/heat_parameters.html (dostęp: 28.08.2026).
- DHI, b.d. FEFLOW 8.1 Documentation – Borehole Heat Exchanger. Dokumentacja online, DHI A/S. <https://download.feflow.com/html/help81/feflow/09_Parameters/Boundary_Conditions/Heat_borehole_heat_exchanger.html> (dostęp: 16.07.2026).
- Diersch H.-J.G., 2014. FEFLOW – Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. *Springer, Berlin*. DOI: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Lanahan M., Tabares-Velasco P.C., 2017. Seasonal thermal-energy storage: A critical review on BTES systems, modeling, and system design for higher system efficiency. *Energies*, 10(6), 743. DOI: 10.3390/en10060743.
- Lundh M., Dalenbäck J.-O., 2008. Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: Initial evaluation. *Renewable Energy*, 33(4), 703–711. DOI: 10.1016/j.renene.2007.03.024.
- Nield D.A., Bejan A., 2013. *Convection in Porous Media*, 4th ed. *Springer, New York*. DOI: 10.1007/978-1-4614-5541-7.
- Piipponen K., Soesoo A., Arola T., Bauert H., Tarros S., 2024. Impacts of groundwater flow on borehole heat exchangers: Lessons learned from Estonia. *Renewable Energy*, 237: 121448. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121448.

PIG-PIB, 2024. Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF) w wybranych lokalizacjach na terenie Polski (2023–2024). *Państwowy Instytut Geologiczny – PIB*.

Ramstad R.K., Justo Alonso M., Acuña J., Andersson O., Stokuca M., Håkansson N., Midttømme K., Rydell L., 2023. The borehole thermal energy storage at Emmaboda, Sweden: First distributed temperature measurements. *Science and Technology for the Built Environment*, 29(2), 146–162. DOI: 10.1080/23744731.2022.2127621.

Sadeghi H., Jalali R., Singh R.M., 2024. A review of borehole thermal energy storage and its integration into district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192: 114236. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114236.

Żeruń M., Jagoda E., Majer E., 2024. Ocena możliwości magazynowania energii cieplnej w górotworze za pomocą systemów zamkniętych (BTES, PTES/TTES, EF) w wybranych lokalizacjach na terenie Polski – zadanie Państwowej Służby Geologicznej. [W:] Streszczenia referatów i posterów. *IV Polski Kongres Geologiczny*, s. 310.



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



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

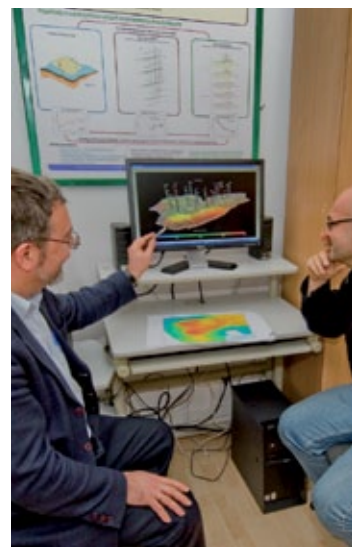


Mgr Mariusz MIZIOŁEK

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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU SYMULACJI ZŁOŻ WĘGLOWODORÓW I PMG

- sporządzanie ilościowych charakterystyk złóż naftowych (konstruowanie statycznych modeli złożowych);
- analizy geostatystyczne dla potrzeb projektowania modeli złóż naftowych, w tym PMG i wielofazowych obliczeń wolumetrycznych;
- konstruowanie dynamicznych symulacyjnych modeli złóż i ich kalibracja;
- wszechstronne badania symulacyjne dla potrzeb:
 - ✦ weryfikacji zasobów płynów złożowych,
 - ✦ wtórnych metod zwiększania wydobywania (załaczanie gazu lub wody, procesy WAG, procesy wypierania mieszającego, oddziaływanie chemiczne),
 - ✦ optymalizacji rozwiercania i udostępniania złóż,
 - ✦ prognozowania złożowych i hydraulicznych (w tym termalnych) charakterystyk odwiertów (w szczególności poziomych) dla celów optymalnego ich projektowania,
 - ✦ sekwestracji CO₂;
- projektowanie, realizacja i wdrażanie systemów baz danych dla potrzeb górnictwa naftowego.



Kierownik: dr inż. Piotr Łętkowski

Telefon: 13 434 96 29

Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno

Faks: 13 436 79 71

E-mail: letkowski@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy