



Barbara TOMASZEWSKA*, Maciej MIECZNIK**

Model koncepcyjno-numeryczny procesu zatłaczania rozcieńczonych wód w warunkach skierniewickiego systemu geotermalnego

Streszczenie: Otwory Skierniewice GT-1 (gł. 3001 m) i Skierniewice GT-2 (gł. 2900 m) zlokalizowane są w południowo-zachodniej części niecki warszawskiej, stanowiącej środkowy fragment niecki brzeżnej. Otworami udokumentowane zostały zasoby wód termalnych w utworach jury dolnej, cechujące się wysoką mineralizacją, powyżej 120 g/dm³. Tak wysokie zasolenie wód implikuje trudności z ich włączaniem z powrotem do górotworu. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowań numerycznych związanych z koncepcją poprawy warunków zatłaczania wód do górotworu poprzez włączanie ich w postaci wód rozcieńczonych wodami odsolonymi w procesach membranowych. Wyniki testu związanego z zatłaczaniem rozcieńczonych wód do górotworu posłużyły do zbudowania modelu koncepcyjnego i numerycznego celem określenia długoterminowych skutków tego procesu. W efekcie możliwe było określenie efektów złożowych wynikających z pracy systemu w dwóch niezależnych układach: 1) przy zatłaczaniu wody o niezmodyfikowanym składzie chemicznym i 2) przy zatłaczaniu wód rozcieńczonych.

Słowa kluczowe: wody termalne, zatłaczanie wód, geotermia

Conceptual and numerical model of the dilute waters injection process into the Skierniewice Geothermal System

Abstract: Skierniewice GT-1 (3001 m deep) and Skierniewice GT-2 (2900 m deep) are located in the South-western part of the Warsaw Trough, which is the central portion of the Marginal Synclinorium. Thermal water resources in Lower Jurassic formation have been documented in both wells, with a mineralization above 120 g/dm³. Such a high salinity implies difficulties with their injection back into the reservoir. This paper presents the results of

* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków, e-mail: tomaszewska@meeri.pl; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: barbara.tomaszewska@agh.edu.pl

** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków, e-mail: miecznik@meeri.pl

numerical modeling related to the concept of improving the conditions for injecting water into the formation by injecting them in the form of diluted waters through their desalination in membrane processes. The test results of dilute waters injection into the formation were used to build a conceptual and numerical model in order to determine the long-term effects of this process. As a result, it was possible to determine the effects of the system operation in two independent arrangements: 1) the injection of waters with unmodified chemical composition and 2) the injection of diluted waters.

Keywords: thermal waters, water injection, geothermics

Wprowadzenie

Wyniki przeprowadzonych badań związanych z zatłaczaniem do złoża rozcieńczonych wód termalnych (Tomaszewska i in. 2016) wykazały korzystne zjawisko związane z poprawą warunków zatłaczania wody termalnej do górotworu po jej rozcieńczeniu wodą odsoloną. Rozcieńczenie wysoko zasolonych wód termalnych może ograniczyć tendencję do wytrącania osadów wtórnych, zwłaszcza węglanu wapnia. Efekt zatłaczania okazał się znacznie bardziej wydajny. Jednakże realizacja tego typu działań na większą, techniczną skalę wymaga dodatkowego rozpoznania zwłaszcza w kontekście zabezpieczenia możliwości długotrwałej i niezawodnej eksploatacji zasobów wraz z adekwatną do potrzeb chłonnością złoża w trakcie włączania wykorzystanych wód do górotworu (Tomaszewska i in. 2016). W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego pracy rozpatrywanego systemu geotermalnego w dwóch niezależnych układach: 1) przy zatłaczaniu wody o niezmodyfikowanym składzie chemicznym i 2) przy zatłaczaniu wód rozcieńczonych.

1. Warunki geologiczne i hydrotermalne obszaru Skierniewic

Otwór badawczy Skierniewice GT-1 (gł. 3001 m), odwiercony w latach 1990–1991 oraz otwór hydrogeologiczny Skierniewice GT-2 (gł. 2900 m), wykonany w latach 1996–1997, zlokalizowane są w południowo-zachodniej części niecki warszawskiej, stanowiącej środkowy fragment niecki brzeżnej (wg podziału Pożaryskiego 1969, rys. 1). Według podziału Polski na prowincje geotermalne obszar Skierniewic jest częścią mezozoicznego subbasenu grudziądzko-warszawskiego (Sokołowski i in. 1995).

Głównymi poziomami dla krążenia wód termalnych na obszarze Skierniewic są warstwy hettangu, synemuru górnego, domeru i toarsu górnego jury dolnej (liasu). Skalami wodonośnymi są piaskowce grubo- i średnioziarniste, przedzielone nieciągłymi seriami osadów słabo przepuszczalnych lub nieprzepuszczalnych, wykształconych w postaci piaskowców drobnoziarnistych, mułowców oraz iłowców (Bujakowska i in. 1991; Bentkowski i in. 1998, Kępińska i in. 2011). Miąższość liasu wynosi od 400 do ponad 1000 m (751 m w otworze Skierniewice GT-1). Serie wodonośne jury dolnej leżą na praktycznie niewodonośnych seriach retyku. Utwory retyku tworzą skały ilaste oraz mułowcowe z wkładkami piaskowców i zlepieńców, o miąższości dochodzącej do 250 m. Uszczelnieniem stropu jury dolnej są przeważnie niewodonośne skały doggeru (piaskowce oraz mułowce z wkładkami łupków, rys. 2). Miąższość jury środkowej dochodzi do 1000 m (468,5 m w otworze Skierniewice GT-1) (Kępińska i in. 2011).

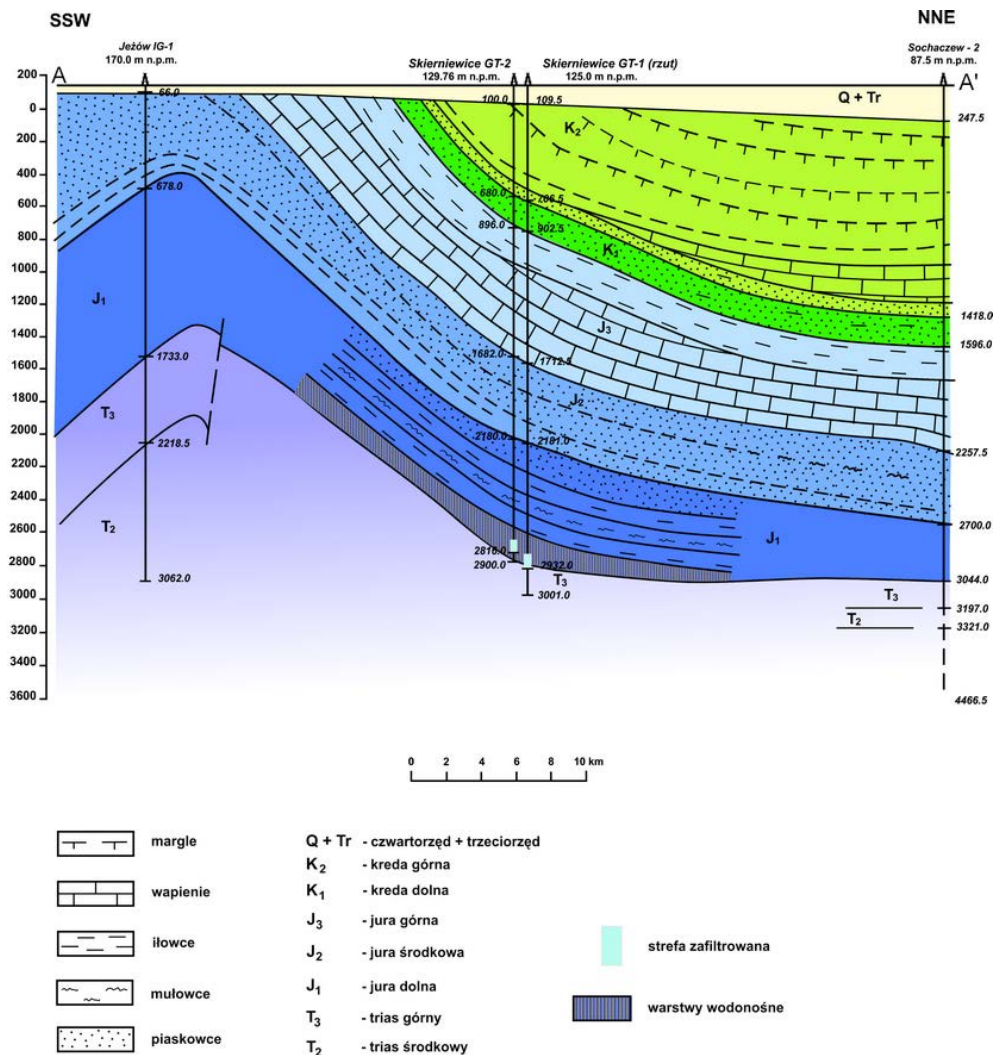


○ obszar badań

Rys. 1. Lokalizacja obszaru Skierniewic na tle mapy jednostek geologicznych Polski według Pożaryskiego (1969) (na podstawie: Kępińska i in. 2011)

Fig. 1. Location of the Skierniewice area against the map of geological units of Poland according to Pożaryski (1969) (based on Kępińska et al. 2011)

Pośród utworów jury dolnej można wyróżnić następujące poziomy wodonośne, począwszy od leżących najpłycej: warstwy borucickie, o miąższości w otworach Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2, odpowiednio 166 i 126 m, warstwy sławęcińskie górne główne (94,5–81 m), warstwy sławęcińskie główne (74,5–70 m) oraz warstwy kłodawskie górne (179,5–160 m). Poziom wód termalnych w otworze Skierniewice GT-1, udostępniony filtrem prętowym znajduje się na głębokości 2875–2941 m p.p.t. (66 m). Jest to fragment warstw kłodawskich górnych. Utwory przepuszczalne stanowią około 40% odcinka zafiltrowanego i znajdują się głównie w dolnej części profilu. Warstwę przepuszczalną stanowią piaskowce grubo- i średnioziarniste, podobnie jak w otworze Skierniewice GT-2, w którym ujęto analogiczny fragment tego horyzontu, w 3 interwałach: 2801,66–2825,73 m, 2843,78–2849,80 m, 2855–2893,84 m – łącznie 48,13 m, z czego piaskowce stanowią około 60% profilu (Bentkowski i in. 1998). Według dokumentacji otworu Skierniewice GT-1 (Bujakowska i in. 1991) porowatość efektywna piaskowców grubo- i średnioziarnistych osiąga wartości do 14–17%, przepuszczalność prostopadła do 3200–8500 mD, a równoległa do 800–5000 mD. W otworze Skierniewice GT-2 piaskowce osiągają porowatość do 20,5% oraz przepuszczalność maks. 6800 mD, przy czym wysokie wartości (1200–6800 mD) oznaczono dla pia-



Rys. 2. Przekrój geologiczny A-A' (lokalizacja na rys. 1)
(na podstawie: Bentkowski i in. 1998, Kępińska i in. 2011)

Fig. 2. Geological cross section A-A' (location on Fig. 1)
(based on Bentkowski et al. 1998; Kępińska et al. 2011)

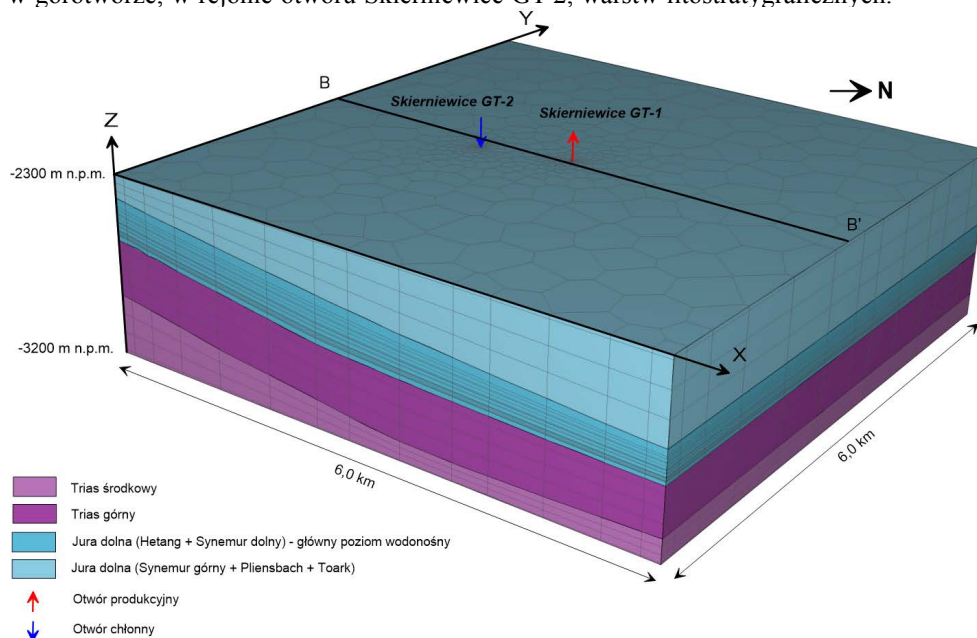
skowców grubo- i średnioziarnistych, niekiedy rozsypliwych. Piaskowce z tego otworu mają nieco gorsze parametry hydrogeologiczne niż z otworu Skierniewice GT-1 (Bentkowski i in. 1998). Zbliżone wartości porowatości efektywnej (14,4–17,6%) dla próbek z otworu Skierniewice GT-1 i nieco niższy przedział wartości (3,6–19,5%, sporadycznie poniżej 1%) dla otworu Skierniewice GT-2 uzyskano podczas badań laboratoryjnych w 2010–2011 r. (Śmist i in. 2011). W badaniach tych uzyskano niższe wartości przepuszczalności (równoległej) dla piaskowców grubo- i średnioziarnistych w otworze Skierniewice GT-1: do 1370 mD. Interpretacja geofizyki wiertniczej z otworu Skierniewice GT-2 pozwoliła na oszacowanie

średniej przepuszczalności w wydzielonych interwałach warstw piaskowcowych w zakresie 186–1143 mD (Bentkowski i in. 1998).

Wartość strumienia ciepłego dla rejonu Skierniewic określono na około 60 mW/m². Temperatura złożowa nawierconych wód termalnych w otworach Skierniewice GT-1 oraz Skierniewice GT-2 wynosi odpowiednio 69,3 oraz 69,0°C (wg pomiarów z 2011 r.) przy gradiencie termicznym rzędu 2,5°C/100 m. Wody zaliczono do typu chlorkowo-sodowego o mineralizacji odpowiednio 116,6 oraz 110 g/dm³ (Bujakowska i in. 1991, 1998).

2. Model numeryczny złoża wód termalnych na obszarze Skierniewic

Utworzony model numeryczny systemu geotermalnego rejonu Skierniewic obejmował swoim zasięgiem obszar 6 x 6 km. W kierunku pionowym model obejmuje warstwy litostratygraficzne znajdujące się pomiędzy rzędnymi -2300 m n.p.m. oraz -3200 m n.p.m. Model składał się z 31 warstw, z czego 19 warstw stanowiło precyzyjne odwzorowanie występującego zróżnicowania litologicznego głównego poziomu wodonośnego (warstw kłodawskich górnych). Siatka obliczeniowa składała się z 14 663 elementów o nieregularnych wymiarach, których powierzchnia i kubatura rośnie wraz z odległością od eksploatowanych otworów (rys. 3). Model poddano wielokrotnym symulacjom kalibracyjnym w celu osiągnięcia przybliżonego rozkładu temperatury i ciśnienia w złożu. Na rysunku 4 przedstawiono prognozowany rozkład temperatury w warunkach przedeksploatacyjnych. W tabeli 1 zestawiono natomiast parametry hydrauliczno-termiczne struktur geologicznych dla występujących w górotworze, w rejonie otworu Skierniewice GT-2, warstw litostratygraficznych.



Rys. 3. Siatka modelu numerycznego

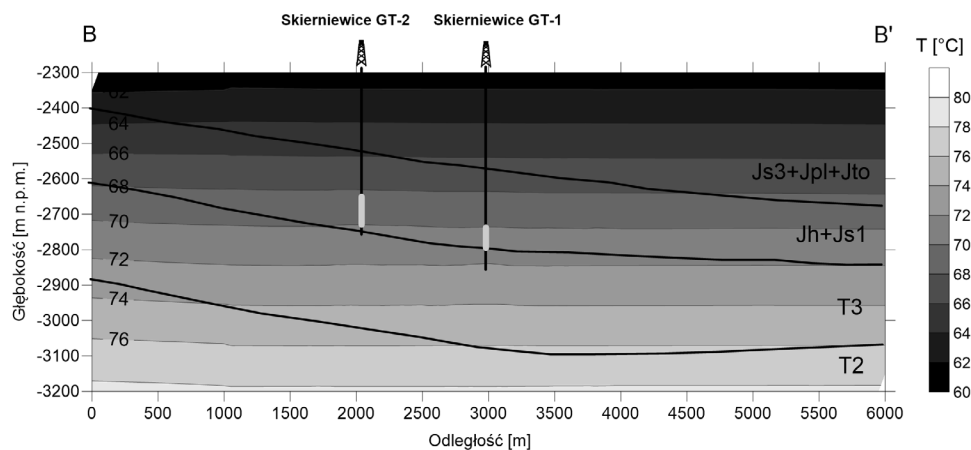
Fig. 3. Numerical model grid

TABELA 1. Zestawienie parametrów hydraulicznych oraz termicznych dla modelowanych warstw zbiornikowych w sąsiedztwie otworu Skierniewice GT-2 (na podstawie: Kępińska i in. 2011)

TABLE 1. List of hydraulic and thermal parameters for reservoir layers in the vicinity of Skierniewice GT-2 borehole (based on Kępińska et al. 2011)

Warstwa	Nazwa	Litologia	h [m]	Φ [-]	$K_{x,y}$ [m^2]	K_z [m^2]	λ [W/m·C]	c_p [J/kg·C]	kh_{tot} [%]	Z_{min} [m p.p.t.]	Z_{max} [m p.p.t.]
w.10	GT2-1	PGR2	2,0	0,19	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	2,4	920	8,77	2 871,9	2 873,9
w.11	GT2-2	PGR2	4,0	0,19	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	2,4	920	17,54	2 867,9	2 871,9
w.12	GT2-3	MULIL	4,8	0,04	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$	3,6	920	0,00	2 863,1	2 867,9
w.13	GT2-4	PGR1	7,2	0,21	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	2,3	920	39,69	2 855,9	2 863,1
w.14	GT2-5	MULIL	6,2	0,04	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$	3,6	920	0,00	2 849,7	2 855,9
w.15	GT2-6	PGR2	4,0	0,19	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	2,4	920	17,54	2 845,7	2 849,7
w.16	GT2-7	MULIL	2,0	0,04	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$	3,6	920	0,00	2 843,7	2 845,7
w.17	GT2-8	MULIL	18,6	0,04	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$	3,6	920	0,00	2 825,1	2 843,7
w.18	GT2-9	PGR3	6,0	0,16	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$5,0 \cdot 10^{-14}$	2,5	920	3,29	2 819,1	2 825,1
w.19	GT2-10	MULIL	15,1	0,04	$1,0 \cdot 10^{-17}$	$5,0 \cdot 10^{-18}$	3,6	920	0,00	2 804,0	2 819,1
w.20	GT2-11	PGR2	3,0	0,19	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	2,4	920	13,16	2 801,0	2 804,0

PGR1, PGR2; PGR3 – piaskowce gruboziarniste i różnoziarniste, MULIL – mułowce, ilowce, h – miąższość warstwy w otworze Skierniewice GT-2, Φ – porowatość efektywna, $K_{x,y}$ – przepuszczalność pozioma, K_z – przepuszczalność pionowa, λ – współczynnik przewodzenia ciepła matrycy skalnej, c_p – pojemność cieplna matrycy skalnej, kh_{tot} – całkowita przewodność hydrauliczna skał zbiornikowych w otworze Skierniewice GT-2 Z_{min} , Z_{max} – górny i dolny interwał warstwy



Objaśnienia:

T2 - trias środkowy, T3 - trias górny, Jh - hetang, Js1 - synemur dolny, Js3 - synemur górny, Jpl - pliënsbach, Jto - toark

Rys. 4. Prognozowany rozkład temperatury w modelu stanu przedeksplatacyjnego wzdłuż przekroju B-B'

Fig. 4. The predicted temperature distribution in the model prior to exploitation along the B-B' cross section

Modelowanie procesu wtłaczania do górotworu schłodzonych wód termalnych w ich niezmodyfikowanym składzie chemicznym oraz mieszanin (wód termalnych rozcieńczonych), zostało wykonane z użyciem programu obliczeniowego TOUGHREACT (Xu i in. 2008). Dzięki wykorzystaniu tego kodu, oszacowano amplitudę zmian parametrów skalnych i hydrodynamicznych przebiegających w strefie przyodwiertowej.

3. Właściwości fizykochemiczne zatłaczanej mieszaniny

Woda termalna z poziomu warstw kłodawskich górnych posiada mineralizację na poziomie 110–116 g/dm³ (kolumna NAT., tab. 2). Modelowanie zatłaczania wody do górotworu przeprowadzono dla eksploatowanej solanki (kol. NAT., tab. 2) oraz mieszaniny solanki z wodą odsoloną (kol. ODS., tab. 2). Modelowanie zrealizowano dla najlepszych parametrów mieszaniny, dla których wg danych z modelowania geochemicznego możliwe było ograniczenie wytrącania osadów wtórnych w instalacji geotermalnej i strefie czynnej otworu chłonnego (Tomaszewska i in. 2016). Wodę termalną eksploatowaną otworem Skierniewice GT-1 zmieszano

TABELA 2. Właściwości fizykochemiczne medium zatłaczanego do górotworu

TABLE 2. Physical and chemical properties of the medium injected into the formation

Zawartość wody odsolonej	NAT.	ODS.	MIX 1	MIX 2
	0%	100%	30%	40%
T [°C]	30	20	27	26
pH	6,36	6,82	6,50	6,54
Wskaźnik	Stężenie [mol/L]			
AlO ₂ ⁻	1,434E-6	–	1,004E-6	8,607E-7
B(OH) ₃	7,490E-4	2,766E-4	6,073E-4	5,600E-4
Ca ⁺²	8,861E-2	–	6,203E-2	5,316E-2
Cl ⁻	1,857E+0	2,426E-4	1,300E+0	1,114E+0
Cu ⁺²	9,548E-6	–	6,683E-6	5,729E-6
F ⁻	2,714E-4	–	1,900E-4	1,629E-4
Fe ⁺²	8,448E-4	3,581E-7	5,914E-4	5,070E-4
HCO ₃ ⁻	3,077E-3	8,733E-7	2,154E-3	1,847E-3
K ⁺	8,646E-3	7,672E-6	6,055E-3	5,191E-3
Li ⁺	3,015E-4	–	2,111E-4	1,809E-4
Mg ⁺²	3,351E-2	–	2,346E-2	2,011E-2
Mn ⁺²	2,544E-5	–	1,781E-5	1,526E-5
Na ⁺	1,630E+0	2,392E-4	1,141E+0	9,780E-1
SiO ₂	3,022E-4	–	2,116E-4	1,813E-4
SO ₄ ²⁻	3,772E-3	–	2,640E-3	2,263E-3
Sr ⁺²	1,258E-3	–	8,808E-4	7,550E-4
Zn ⁺²	4,081E-6	–	2,856E-6	2,448E-6

z wodą odsoloną w proporcjach 70/30 oraz 60/40 uzyskując roztwory oznaczone symbolami MIX1 oraz MIX2 (tab. 2). Modelowanie numeryczne zatłaczania medium do górotworu przeprowadzono w warunkach eksploatacji dubletu ze stałą wydajnością 50 m³/h, w okresie 10 lat. Analizowane scenariusze eksploatacji dotyczyły przypadków zatłaczania: 1) naturalnej wody złożowej oraz 2) roztworów MIX1 i MIX2 z temperaturą podaną w tabeli 2.

4. Charakterystyka mineralogiczna ośrodka skalnego

Poziom wodonośny występujący w warstwach kłodawskich górnych jest zbudowany z piaskowców grubo- i średnioziarnistych oraz piaskowców drobnoziarnistych, mułowców i iłowców. Zawartość węglanów w tych utworach nie przekracza 1% (Bujakowska i in. 1991; Bentkowski i in. 1998; Kępińska i Pawlikowski 2011). Piaskowce gruboziarniste występują głównie w dolnej części profilu, a ich miąższość wynosi 3–7 m. Piaskowce są średniozwięzłe, słabo obtoczone (ostro- i średniokrawędziaste), przeważają ziarna o wielkości od 0,35 do 1,2 mm. Część porów jest wzajemnie połączona. Wielkość porów waha się w zakresie od poniżej 10 µm do ponad 1000 µm (Kępińska i Pawlikowski 2011). Głównym minerałem budującym skały piaskowcowe jest kwarc, w mniejszych ilościach występują skalenie, natomiast sporadycznie okruszy iłowców (tab. 3). Spoiwo zalicza się do ilastego

TABELA 3. Udział objętościowy minerałów budujących matrycę skalną

TABLE 3. The volume fraction of minerals building the rock matrix

Nr warstwy (wg podziału na rys. 3)	Interwał [m p.p.t.]	Litologia (wg warstw w modelu)	Skład mineralogiczny (udział objętościowy)
20	2801,0–2804,0	PGR2	95% kwarc, 1,5% illit, 1% skażeń potasowy, 0,9% muskowit, 1,6% subst. organiczna
19	2804,0–2819,1	MULIL	47% illit, 31,6% kwarc, 3,9% muskowit, 17,5% subst. organiczna
18	2919,1–2825,1	PGR3	91,5% kwarc, 3,2% illit, 1% skażeń potasowy, 0,9% muskowit, 3,4% subst. organiczna
17	2825,1–2843,7	MULIL	82,9% kwarc, 3,3% illit, 1,2% skażeń potasowy, 0,4% plagioklasy, 6,3% muskowit, 6,7% subst. organiczna
16	2843,7–2845,7	MULIL	82,9% kwarc, 3,3% illit, 1,2% skażeń potasowy, 0,4% plagioklasy, 6,3% muskowit, 6,7% subst. organiczna
15	2845,7–2849,7	PGR2	95% kwarc, 1,5% illit, 1% skażeń potasowy, 0,9% muskowit, 1,6% subst. organiczna
14	2849,7–2855,9	MULIL	47% illit, 31,6% kwarc, 3,9% muskowit, 17,5% subst. organiczna
13	2855,9–2863,1	PGR1	98% kwarc, 0,2% skażeń potasowy, 0,3% muskowit, 17,5% subst. organiczna
12	2863,1–2867,9	MULIL	70% kwarc, 9,8% illit, 0,8% skażeń potasowy, 6,9% muskowit, 12,2% subst. organiczna
11	2867,9–2871,9	PGR2	95,6% kwarc, 1,4% illit, 0,6% plagioklasy, 0,2% muskowit, 2,2% subst. organiczna
10	2871,9–2873,9	PGR2	95,6% kwarc, 1,4% illit, 0,6% plagioklasy, 0,2% muskowit, 2,2% subst. organiczna

oraz ilasto-krzemionkowego. Mineralem budulcowym piaskowców średnio- i różnoziarnistych oraz piaskowców drobnoziarnistych jest przede wszystkim kwarc, w dalszej kolejności skalenie, mułowce oraz plagioklasy (tab. 3). W tabeli 4 zestawiono przyjęte w obliczeniach modelowych parametry kinetyczne charakteryzujące składniki uczestniczące w procesach geochemicznych.

TABELA 4. Parametry kinetyczne charakteryzujące minerały budujące matrycę skalną (na podstawie: Palandri i Kharaka 2004; Kovac i in. 2006).

TABLE 4. The kinetic parameters characterizing the matrix-building rock minerals (based on Fan 2010; White et al. 2005; Palandri 2004; Kovac et al. 2006)

Minerał	k_{25} [mol·m ⁻² ·s ⁻¹]	EA [kJ/mol]	A [cm ² /g]
Kalcyt	1,6E-09	41,87	9,8
Dolomit	6,0E-10	41,87	9,8
Illit	1,7E-13	35,00	151,6
Kwarc	1,0E-14	87,70	9,8
Muskowit	1,0E-14	87,70	9,8
Kaolinit	6,6E-14	22,20	151,6
Albit	2,75E-13	69,80	9,8
K-Feldspar	3,89E-13	38,00	9,8

Oznaczenia w tabeli 4 jak w równaniach 1–2.

5. Wyniki badań modelowych włączania wód do górotworu

Oddziaływanie wód złożowych oraz wód zatłaczanych do złoża ze skałami zbiornikowymi można opisać stosując równania równowagi hydrochemicznej. Tempo rozpuszczania bądź wytrącania minerałów budujących formację zbiornikową można oszacować wykorzystując równanie kinetyczne reakcji chemicznej woda–skała (Palandri i Kharaka 2004; Xu i in. 2008):

$$r_n = \pm k_n A_n \left| 1 - \left(\frac{Q_n}{K_n} \right)^{\Theta} \right|^n \quad (1)$$

gdzie:

- r_n – tempo reakcji [mol/s],
- k_n – stała szybkości reakcji rozpuszczania/wytrącania [mol/(m²·s)],
- A_n – powierzchnia czynna [m²],
- Q_n – iloczyn aktywności [-],
- K_n – stała równowagi reakcji rozpuszczania [-],
- Θ, η – współczynniki empiryczne, dla większości minerałów przyjmuje się, że są równe 1 [-],
- n – indeks minerału.

Stała szybkości reakcji chemicznej woda–skała – zgodnie z prawem Arrheniusa, zależy od temperatury oraz energii aktywacji (równanie 2):

$$k_n = k_{25} \exp \left[-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

- k_{25} – stała szybkości reakcji w temperaturze 25°C [mol/(m²·s)],
- E_A – energia aktywacji Arrheniusa [J/mol],
- R – uniwersalna stała gazowa [J/(mol·K)],
- T – temperatura absolutna [K].

Tempo reakcji chemicznej woda–skała jest kontrolowane również przez pH. Można wyróżnić 3 mechanizmy, w której wartość odczynu pH pełni rolę katalizatora reakcji: neutralny, kwaśny oraz zasadowy. Stąd pełne równanie umożliwiające wyznaczenie wartości stałej szybkości reakcji chemicznej woda–skała ma postać:

$$k_n = k_{25}^N \exp \left[-\frac{E_A^N}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] + k_{25}^H \exp \left[-\frac{E_A^H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] + k_{25}^{OH} \exp \left[-\frac{E_A^{OH}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right] \quad (3)$$

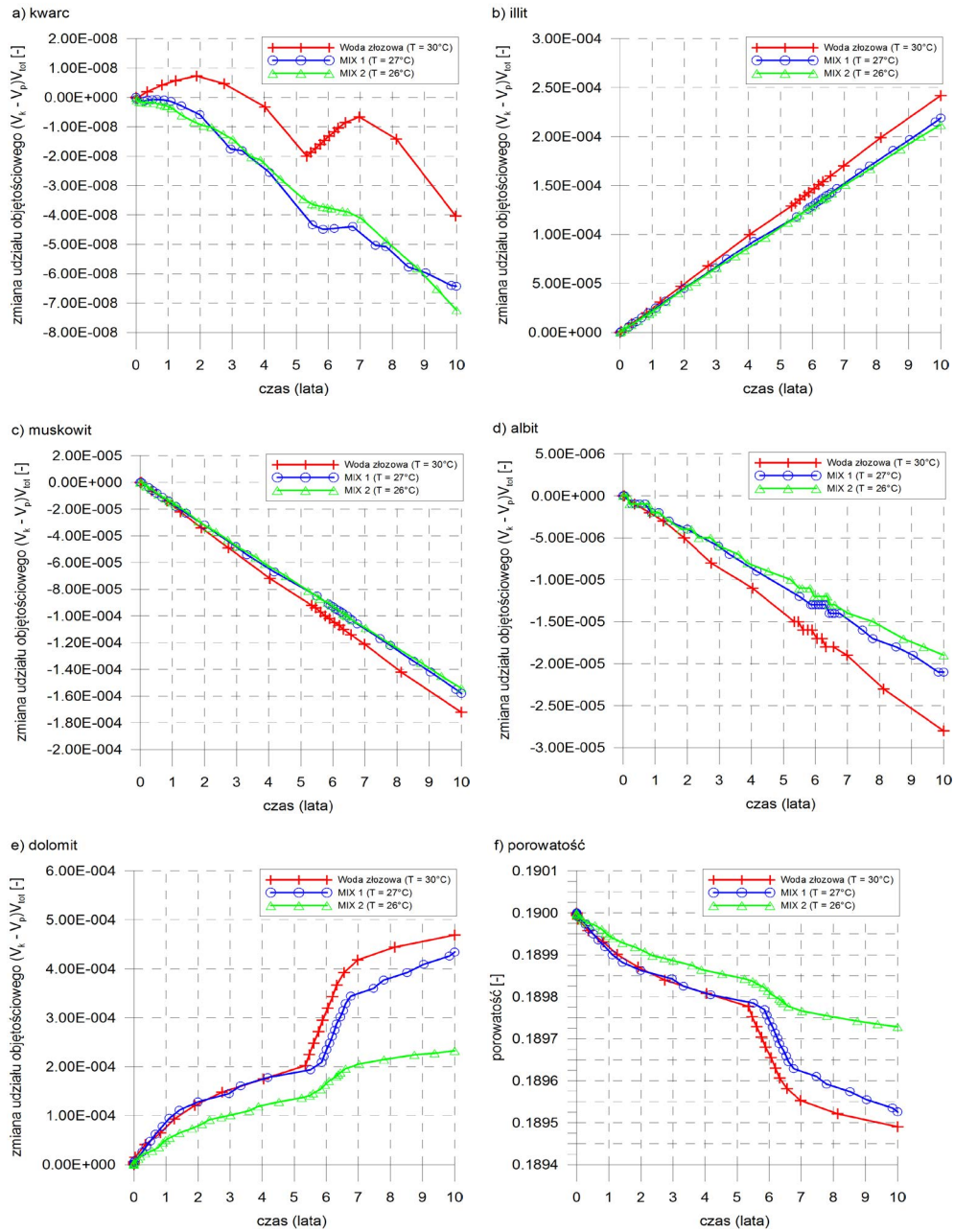
gdzie:

- indeksy N, H oraz OH oznaczają odpowiednio mechanizm neutralny, kwaśny i zasadowy kontrolujący szybkość reakcji woda–skała.

Powyższe równania stanowią podstawę obliczeń geochemicznych w symulatorze TOUGHREACT.

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany objętości poszczególnych minerałów w profilu piaskowców gruboziarnistych otworu Skierniewice GT-2 w czasie. Zmiany te zdefiniowane są jako różnica pomiędzy objętością minerału w fazie końcowej modelowania (po 10 latach) i objętością początkową (ΔV). Zamodelowane procesy zmian wynikają z reakcji woda–skała zachodzących podczas wtlaczania do górotworu wody termalnej oraz wody zmodyfikowanej na skutek zmieszania z wodą odsoloną. Wyniki badań modelowych wykazały, iż kwarc, główny budulec skał zbiornikowych, nie uczestniczy w sposób istotny w reakcjach geochemicznych. Wytrącaniu mogą jednak ulegać illit (rys. 5b), kaolinit oraz dolomit (rys. 5e). Procesy te przebiegają intensywniej dla wody o niezmodyfikowanym składzie chemicznym. W rezultacie, porowatość utworów piaskowcowych w strefie przyotworowej nieznacznie spada.

Wykonane obliczenia dla rozpatrywanych wariantów obejmujących wtlaczanie wody termalnej i wody termalnej rozcieńczonej (60/40 i 70/30) wskazują, że pomimo różnych parametrów zatłaczanej cieczy zmiany w strukturze budulcowej poszczególnych interwałów wodonośnych, jak również warstw słabo- oraz nieprzepuszczalnych będą znikome. Zmiany parametrów zbiornikowych w analizowanym przypadku są praktycznie niezauwa-



Rys. 5. Czasowe zmiany udziału objętościowego minerałów tworzących matrycę skalną skał piaskowcowych: a) kwarcu, b) illitu, c) muskowitu, d) albitu, e) dolomitu oraz f) porowatości w otoczeniu otworu chłonnego Skierniewice GT-2

Fig. 5. Temporal change of volume fraction of minerals forming the rock matrix of sandstone rocks: a) quartz, b) illite, c) muscovite, d) albite and e) dolomite and f) porosity in the vicinity of Skierniewice GT-2 injection well

żalne. Oznacza to, że parametry hydrogeologiczne skał zbiornikowych nie będą ulegały istotnym zmianom, zarówno w przypadku zatłaczania do złoża wód o niezmodyfikowanym, jak i zmodyfikowanym składzie fizykochemicznym. Bardziej złożonym problemem okazuje się jednak kwestia zmian przepuszczalności w otworze chłonnym, głównie w strefie filtra, gdzie następuje kolmatacja i obniżenie chłonności na skutek wytrącania osadów wtórnych wytraconych z wody. Ten aspekt rozpoznany został zarówno na etapie prac modelowych (Tomaszewska i Pająk 2012) jak i w wyniku prac badawczych zrealizowanych na otworze chłonnym (Kępińska i in. 2011; Tomaszewska i in. 2016).

Przeprowadzone obliczenia modelowe nie potwierdziły obserwowanych w praktyce (Tomaszewska i in. 2016) zależności dotyczących wzrostu ciśnienia zatłaczania i spadku indeksu chłonności w czasie eksploatacji otworu chłonnego. Wymagane ciśnienie zatłaczania rośnie również ze wzrostem strumienia zatłaczanego do złoża płynu, maleje natomiast wraz ze wzrostem jego temperatury. Testy związane z zatłaczaniem rozcieńczonych wód wykazały spadek ciśnienia tłoczenia, wynikający z obniżonej tendencji do skalingu (Tomaszewska i in. 2016).

Wnioski

Modelowanie geochemiczne reakcji zachodzących w trakcie zatłaczania wód do górotworu stanowi duże wyzwanie. Wykorzystanie złożonych modeli matematycznych może dotyczyć reakcji w otworze wiertniczym lub wyłącznie badanej struktury geologicznej, jako ogólnego ośrodka, w którym mogą zachodzić różnorodne reakcje chemiczne. W dużej mierze do najistotniejszych problemów związanych z obniżeniem chłonności otworów wiertniczych dochodzi jednak w nich samych. Potwierdziły to wcześniejsze badania (Kępińska i in. 2011; Tomaszewska i Pająk 2012). Dlatego, jak wykazano w niniejszej pracy, ograniczenie się wyłącznie do modelu struktury i reakcji zachodzących w niej samej nie odzwierciedla w pełni całokształtu obserwowanych w rzeczywistości efektów.

Analizując wpływ poszczególnych czynników na warunki prowadzenia procesu zatłaczania do górotworu wysoko zmineralizowanych wód, można stwierdzić, że matematyczny opis procesu – ze względu na ilość zmiennych na niego wpływających – stanowi skomplikowane zagadnienie. Sam matematyczny opis własności fizycznych zmineralizowanych wód w funkcji ciśnienia, temperatury i składu chemicznego wody wiąże się ze stosowaniem równań empirycznych opracowanych dla konkretnych, nie zaś ogólnych, przypadków. Zadanie to jest więc procesem złożonym. Wymaga bardzo dokładnego rozpoznania, zarówno w zakresie tendencji do wytrącania osadów wtórnych z wody, parametrów zatłaczania i reakcji zachodzących w obrębie konstrukcji otworu chłonnego i dopiero w następnej kolejności bezpośrednio zachodzących w wodonośnej strukturze geologicznej. Przykład tak szerokiego rozpoznania całokształtu tych czynników będzie przedmiotem kolejnej publikacji.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej IGSMiE PAN.

Literatura

- Bentkowski i in. 1998 – Bentkowski, A., Biernat, H., Bujakowska, K. i Kapuściński, J. 1998. *Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych wód termalnych z utworów jury dolnej w Skierniewicach*. Arch. CAG, Warszawa (materiały niepublikowane).
- Bujakowska i in. 1991 – Bujakowska, K., Biernat, H. i Jaworska, I. 1991. *Dokumentacja wynikowa geologiczno-hydrogeologiczna otworu Skierniewice GT-1*. Cz. 1. Arch. CAG, Warszawa (materiały niepublikowane)
- Kępińska i in. 2011 – Kępińska, B. red. nauk., Bujakowski, W. red. nauk., Bielec, B., Tomaszewska, B., Banaś, J., Solarski, W., Mazurkiewicz, B., Pawlikowski, M., Pająk, L., Miecznik, M., Balcer, M. i Hołojuch, G. 2011. *Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych*, s. 177–183. Kraków: Wyd. EJB, Ministerstwo Środowiska.
- Kępińska, B. 2011. Warunki geologiczne, hydrogeologiczne i geotermalne obszaru Skierniewic. [W:] B. Kępińska red. nauk., W. Bujakowski red. nauk., B. Bielec, B. Tomaszewska, J. Banaś, W. Solarski, B. Mazurkiewicz, M. Pawlikowski, L. Pająk, M. Miecznik, M. Balcer, G. Hołojuch – *Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych* (strony 177–183). Kraków: Wyd. EJB, Ministerstwo Środowiska.
- Kępińska, B. i Pawlikowski, M. 2011. Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna, parametry hydrogeologiczne skał zbiornikowych – otwory Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2. [W:] B. Kępińska red. nauk., W. Bujakowski red. nauk., B. Bielec, B. Tomaszewska, J. Banaś, W. Solarski, B. Mazurkiewicz, M. Pawlikowski, L. Pająk, M. Miecznik, M. Balcer, G. Hołojuch – *Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych* (strony 177–183). Kraków: Wyd. EJB, Ministerstwo Środowiska.
- Kovac i in. 2006 – Kovac, K.M., Xu, T., Pruess, K. i Adams, M.C. 2006. *Reactive chemical flow modeling applied to injection in the Coso EGS experiment*. Proceedings of Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, SGP-TR-179.
- Palandri, J.L. i Kharaka, Y.K. 2004. A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. *U.S. Geological Survey Open File Report 2004–1068*, Menlo Park, California.
- Parkhurst, D.L. i Appelo, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQCI (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimension transport and inverse geochemical calculations: *U.S Geological Survey Water-Resources Investigation Report*, s. 97–4259.
- Pożaryski, W. 1969. Podział obszaru Polski na jednostki tektoniczne. *Przegląd Geologiczny* 2.
- Sokołowski i in. 1995 – Sokołowski, J., Sokołowska, J., Plewa, S., Nagy, S., Krotoszyńska, M. i Krzysiek, U. 1995. *Prowincje i baseny geotermalne Polski*. Kraków: Wyd. CPPGSMiE PAN.
- Śmist i in. 2011 – Śmist, P., Wielgosz, K., Kopczyński, R. i Kocik, D. 2011. *Badanie wpływu cieczy kwasującej na własności skał strefy chłonnej odwiertów Skierniewice GT-1 i Skierniewice GT-2*. Laboratorium PETROGEO PULiG Sp. z o.o. w Wołominie – oddział w Jaśle. Raport nr LJ/3123/P/04/11. (materiały niepublikowane).
- Tomaszewska i in. 2016 – Tomaszewska, B., Bielec, B. i Kasztelewicz, A. 2016. Efektywność zatłaczania do górotworu wód termalnych o zmodyfikowanych właściwościach fizykochemicznych. *Przegląd Górniczy* (w druku).
- Tomaszewska, B. i Pająk, L. 2012. Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowland. *Archives of Environmental Protection* 38/3, s. 103–117.
- Xu i in. 2008 – Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N. i Pruess, K. 2008. TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geological Media, V1.2.1, LBNL-55460-2008, Berkeley, California.

