

Politechnika Wroclawska
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Wachowicz-Pyzik pt.
**„Ocena geologicznych uwarunkowań inwestycji geotermalnych
przy wykorzystaniu modelowania numerycznego
na przykładzie utworów jury dolnej w niecce szczecińsko-mogileńsko-lódzkiej”**

Recenzja niniejsza powstała na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prof. dr. hab. inż. Jacka Matyszkiewicza z dn. 08.07.2019 r. (pismo nr WGGiOŚ-dz.0154-242/2019).

We współczesnej geologii i hydrogeologii z kilku ich priorytetowych kierunków rozwoju wymienić można hydrogeotermię. Wody termalne – a ściślej geotermalne - są wdzięcznym obiektem badań. Centralna i północno-zachodnia część Niżu Polskiego, jest w tym zakresie obszarem interesującym w Polsce – budujące je jednostki geologiczne, niecka mogileńsko-lódzka i niecka szczecińska, będące częścią synklinorium szczecińsko-miechowskiego, tworzą wyraźny system geotermalny, rozpoznany już wierceniami w wielu miejscach.

Innym z priorytetowych kierunków obecnie realizowanych prac geologicznych jest modelowanie numeryczne. Prace w tym zakresie korzystają z coraz nowszych osiągnięć innych nauk, w tym geofizyki i matematyki.

Oba wymienione wyżej kierunki połączone zostały przez Doktorantkę w recenzowanej rozprawie, i to połączone z pełnym powodzeniem.

I. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca liczy 203 numerowane strony, na które składa się główna część pracy zawierająca *Wstęp*, osiem rozdziałów merytorycznych oraz *Wnioski*, a także *Literaturę* (w sumie 192 strony); dodatkowo w końcowej części pracy zamieszczono spisy (w sumie 11 stron) 146. rysunków i 15. tabel, a także 7. załączników, które dołączono do pracy w formie osobnego zeszytu, a zawierających wyniki interpretacji krzywych geofizyki otworowej.

Po *Wstępie*, w którym przedstawione zostały m.in. cel, tezy i zakres pracy, pięć kolejnych rozdziałów ma charakter wprowadzający. W rozdziale 2. ogólnie scharakteryzowano istniejące programy komputerowe do modelowania dynamicznego systemów geotermalnych, szczególną uwagę zwracając na program TOUGH, w rozdziale 3. przedstawiono metodykę badań, prezentując zebrane dane, ich interpretację i reinterpretację oraz tworzone modele, w rozdziale 4. zaprezentowano charakterystykę geologiczną niecki szczecińsko-mogileńsko-

łódzkiej, a w rozdziale 5. podano charakterystykę parametrów geotermalnych jej utworów jury dolnej. W rozdziale 6. Doktorantka omówiła metodykę wyboru oraz lokalizację obszarów badań szczegółowych. Najważniejszymi merytorycznie są rozdziały 7. i 8., w których wieloaspektowo rozpatrzono modele dubletów geotermalnych w rejonie Choszczna i w rejonie Malanowa. W rozdziale 9 przeprowadzono analizę porównawczą obu modelowanych rejonów badań. Rozdział 10 zawiera wypływające z pracy wnioski. Spis literatury obejmuje 153 prace publikowane i niepublikowane, z których siedem nie było powołanych w rozprawie.

II. Cel pracy i zastosowane metody badań

Celem pracy było „modelowanie pracy dubletu geotermalnego w skali lokalnej, w tym optymalizacja eksploatacji ujęć oraz samego procesu symulacji numerycznych” (s. 55). Równocześnie Doktorantka postawiła cztery tezy pracy:

1. wszechstronna analiza warunków geologicznych jest podstawowym czynnikiem oceny potencjału rozwoju inwestycji o charakterze geotermalnym;
2. weryfikacja budowy geologicznej i parametrów ma wpływ na możliwość wykorzystania energii geotermalnej poprzez wykonanie modelu numerycznego ośrodka geologicznego;
3. modelowania numeryczne umożliwiają w szczególności ocenę odnawialności zasobów wybranego obszaru badań i mogą stanowić podstawę do szacowania ryzyka inwestycyjnego
4. dynamiczne modelowanie zmienności parametrów petrofizycznych i hydrotermalnych umożliwia wybór optymalnej lokalizacji inwestycji geotermalnej – w tym lokalizację otworu wydobywczego, jak i zatłaczającego dla wybranego obszaru badań, a także wybór typu instalacji oraz ocenę i efektywności jej funkcjonowania.

Do osiągnięcia tego celu i udowodnienia postawionych tez Doktorantka dochodziła kilkoma krokami. Na początku

- a) oprócz licznych prac publikowanych zebrała obszerny materiał archiwalny z szeregu instytucji i firm, dokonując ich interpretacji i reinterpretacji, w tym także geofizycznych profilowań otworów wiertniczych z lat 1960-1982,
- b) zbudowała model koncepcyjny, rozszerzając go dodatkowo o model statyczny, a także dysponując już obszerną wiedzą i licznymi wynikami Doktorantka:
- c) przeprowadziła wielowariantowe modelowania pracy dwóch systemów geotermalnych analizując możliwość wychłodzenia horyzontu zbiornikowego przy różnych wydajnościach ujęć,
- d) wykonała symulację pracy dubletów geotermalnych dla różnych wydajności i odległości pomiędzy odwiertami tych dubletów,

Prezentowane zagadnienia zostały atrakcyjnie przedstawione na licznych mapach i ilustracjach.

Na tle tak uzyskanych rezultatów i po ich szczegółowej dyskusji Doktorantka przeprowadziła wnioskowanie.

III. Zalety pracy

Recenzowana praca po raz pierwszy tak szczegółowo przedstawia studium projektowanego przypadku dwóch dubletów geotermalnych w obrębie utworów jury dolnej niecki

szczecińsko-mogileńsko-łódzkiej. Podstawową zaletą pracy jest to, że Autorka wykorzystując istniejące informacje i wykonując ich szczegółową interpretację i reinterpretację poszerzoną o rezultaty własnych obliczeń szeregu danych interesująco zrealizowała tytułowe zagadnienie.

Doktorantka:

- a) Szczegółowo przedstawiła poszczególne zagadnienia wpływające na metodykę pracy. Zwróciła uwagę na:
 - pozyskanie danych archiwalnych i nowych wyników z badań przeprowadzonych w trakcie wiercenia głębokich otworów, wyniki badań geofizyki otworowej oraz badań geofizycznych (głównie badań sejsmicznych);
 - interpretację i reinterpretację danych geofizyki otworowej. Pozwoliły one – przy współpracy z geofizykiem – wydzielić warstwy wodonośne poziomu jury dolnej, a także określić ich zailenie, porowatość i in.;
 - interpretację danych sejsmicznych 2D także w celu wydzielenia poszczególnych horyzontów jury dolnej;
 - stworzenie modelu koncepcyjnego, który poszerzyła o cyfrowy model statyczny, w celu przedstawienia budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych obszarów badań wraz z rozkładem analizowanych parametrów (porowatość, przepuszczalność) oraz uwzględnieniem uwarunkowań tektonicznych;
 - stworzenie modeli dubletów geotermalnych.
- b) Niezwykle starannie zaprezentowała charakterystykę geologiczną, w tym tektoniczną, niecki szczecińsko-mogileńsko-łódzkiej ze szczególnym uwzględnieniem odrębnie niecki szczecińskiej oraz niecki mogileńsko-łódzkiej.
- c) Koncentrując swe rozważania na utworach jury dolnej – jako najbardziej rozpoznawego i perspektywicznego zbiornika geotermalnego na Niżu Polskim – scharakteryzowała jego parametry geotermalne:
 - temperaturę wód, która wynosi od 20 do 90°C w niecce szczecińskiej i od 30 do ponad 100°C w niecce mogileńsko-łódzkiej;
 - mineralizację wód, wynoszącą głównie od kilkudziesięciu do ponad 150 g/dm³ w niecce szczecińskiej oraz do 250 g/dm³ w niecce mogileńsko-łódzkiej (w obu nieckach pojawiają się też wody o anomalnie niskich mineralizacjach wynikających z dopływu wód infiltracyjnych lub kredowych);
 - porowatość i przepuszczalność, wynoszące odpowiednio od poniżej 20 do ponad 30% oraz od 400 do 3500 mD;
 - potencjalną wydajność dubletu geotermalnego, która wynosi 250-350 m³/h w niecce szczecińskiej oraz od ponad 100 do 300-450 m³/h w niecce mogileńsko-łódzkiej, przy przewodnościach wynoszących głównie 2·10⁻³ m²/s i miąższościach warstw wodonośnych od kilku do 800 m;
- d) Wybrała do dalszej szczegółowej analizy dwa obszary zróżnicowane pod względem budowy geologicznej poziomów kolektorskich oraz ich parametrów – jeden w południowej części niecki szczecińskiej w rejonie Choszczna, drugi w południowo-zachodniej części niecki mogileńsko-łódzkiej w jej sąsiedztwie z monokliną przed-sudecką, w rejonie Malanowa (na E od Kalisza i na S od Konina). W obu obszarach zostały zamodelowane dublety geotermalne;
- e) Stworzyła model dubletu geotermalnego w rejonie Choszczna dochodząc do niego w kilku etapach:
 - stworzenie modelu koncepcyjnego – w którym przedstawiła budowę geologiczną, zidentyfikowała strefy dopływu wód do utworów jury dolnej oraz uwzględniła wyniki badań czterech głębokich wierceń o głębokości ponad 1000 m;

- określenie parametrów petrofizycznych skał wykorzystując ponowną interpretację (z powodu słabej jakości danych z lat 1960-1971) profilowań geofizycznych otworów oraz opisy rdzeni. W rezultacie określono litologię skał, ich zailenie oraz porowatość, choć możliwe to było tylko nie w całych przelotach;
- określenie parametrów termicznych skał przyjmując, że gęstość powierzchniowego strumienia ciepłego wynosi $80-85 \text{ mW/m}^2$, z powodu zaś braku poprawnego profilowania temperatury w warunkach ustabilizowanych w jedynym na tym obszarze otworze głębokim, po wykonaniu korekty krzywej temperatury określono gradient geotermiczny w utworach jury dolnej na $3,47 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (o $0,35 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ więcej niż dla utworów całego mezozoiku);
- utworzenie modelu statycznego, który umożliwił określić optymalną lokalizację dubletu geotermalnego, a w skład którego wszedł:
 - 1) model strukturalny stanowiący fragment wcześniej sporządzonego przez zespół Papiernika (2012) takiego modelu dla całej niecki szczecińskiej, ale dodatkowo skalibrowany i powtórnie zasymulowany w zakresie parametrów petrofizycznych. Założono tu pięciometrową miąższość kompleksów jurajskich. Sporządzono odpowiednie mapy strukturalne powierzchni stropowych oraz mapy miąższości sześciu poszczególnych poziomów dolnej jury;
 - 2) model parametryczny, w całości stworzony w ramach pracy z wykorzystaniem programu Petrel, który objął przestrzenne modele litologiczny, zailenia (śr. $0,09-0,46$), porowatości efektywnej (śr. $8-22\%$) i przepuszczalności (śr. $120-1750 \text{ mD}$); każdorazowo modele zilustrowane zostały odpowiednimi mapami oraz zestawieniami profilowań otworowych tych parametrów. W końcu wydzielono w modelu warstwy uszczelniające i wodonośne (na podstawie interesujących wykresów zależności zailenia z przepuszczalnością i porowatością efektywną skał), a także sporządzono mapy miąższości warstw wodonośnych dla kolejnych horyzontów jury dolnej, dla których w końcu obliczono i zilustrowano na kolejnych mapach potencjalną wydajność otworów, które wynosiły od 10 do $180 \text{ m}^3/\text{h}$ (średnio $160-180 \text{ m}^3/\text{h}$).
- utworzenie modelu pracy dubletu geotermalnego w programie TOUGH2, jako uwieńczenie dotychczasowych prac. W obrębie modelowanego obszaru o powierzchni 115 km^2 ośmiu wydzieleniom stratygraficznym przypisano wartości poszczególnych parametrów petrofizycznych i geotermicznych skał po czym model poddano kalibracji odnosząc się do skorygowanej krzywej temperatury. Z kolei do modelu wprowadzono dwa otwory (produkcyjny i zatłaczający) o głębokościach ok. 1500 m . Dalsza optymalizacja modelu objęła symulacje:
 - 1) wielkości powierzchni poligonalnych komórek w sąsiedztwie otworów wpływające na gęstość siatki obliczeniowej. Stwierdzono, że powierzchnie komórek modelu w sąsiedztwie otworów nie powinny przekraczać 100 m^2 ;
 - 2) minimalnego kąta oczka siatki obliczeniowej, który – jak wykazano – nie ma istotnego znaczenia w obliczeniach i przyjęto go w wysokości 30° ;
 - 3) odległości pomiędzy otworami, dzięki której stwierdzono – badając zmiany ciśnienia i temperatury - że odległość 1000 m pomiędzy otworami po 50 latach eksploatacji nie wpłynie na zmiany temperatur i nie doprowadzi do wychłodzenia poziomu zbiornikowego;
 - 4) wydajności eksploatacyjnych, które dla odległości pomiędzy otworami większej od 1000 m dla wartości $60-180 \text{ m}^3/\text{h}$ okazały się bezpieczne i nie groziły „przebicciem frontu chłodnego”.

Wszystko to jest przejrzyste ilustrowane odpowiednimi mapami i wykresami. Powstały model wskazał, że w rejonie Choszczna możliwe jest uzyskanie temperatury wód ok. 57°C przy ciśnieniu w strefach obu otworów ok. 15,5 MPa i maksymalnej wydajności dubletu 180 m³/h.

- f) Stworzyła drugi model dubletu geotermalnego w rejonie Malanowa czyniąc identyczne kroki, takie jak w pierwszym modelu i uwzględniając miejscowe różnice. Modelowanie statyczne (strukturalne i parametryczne) wykazało tu gorsze właściwości zbiornikowe obszaru (zailenie - śr. 0,3-0,45, porowatość efektywna - śr. 6,5-10% i przepuszczalność - śr. 44-130 mD), a potencjalne wydajności otworów wynoszące 5-120 m³/h (śr. 42,5-67 m³/h). Wynikowy model dubletu geotermalnego przy jego powierzchni 162,5 km² i przy ujmowaniu wód na głębokości ok. 2200 m wskazał, że możliwe jest tu uzyskanie wyższej temperatury wód ok. 86°C przy wyższym ciśnieniu w strefach obu otworów ok. 22 MPa i mniejszej maksymalnej wydajności 120 m³/h.

Powyższa treść wskazuje, że praca ma bardzo przejrzysty i logiczny układ oraz podział na rozdziały. Praca napisana jest bardzo ładnym stylem i łatwo się ją czyta. Uwagę zwraca wykonana adiustacja językowa oraz niezwykle staranna szata graficzna.

Praca ma znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne – zwraca uwagę, że odbiorcami uzyskanej energii geotermalnej głównie w celach energetycznych mogły by być tak miasto Choszczno, jak i gminy rejonu Malanowa. Wszystko to możliwe było dzięki umiejętnej interpretacji danych geologicznych, geotermicznych, geofizycznych i umiejętnemu wykorzystaniu odpowiednich obliczeń, a także opanowaniu wielu tematycznych programów komputerowych.

W efekcie powyższych prac i interdyscyplinarnego podejścia do postawionego celu powstała dysertacja przedstawiająca spójny i precyzyjny obraz warunków geotermicznych w wybranych rejonach niecek szczecińskiej i mogileńsko-lódzkiej oraz efekty dwóch hipotetycznych dubletów geotermalnych. Jest to niekwestionowane osiągnięcie pracy.

Nie oznacza to jednak, że nie mam do pracy uwag, choć są to uwagi nieliczne.

IV. Uwagi krytyczne

a) Uwagi natury merytorycznej

- 1) Tworząc modele przepuszczalności w obu badanych obszarach wykonano je dla każdego wydzielenia stratygraficznego z uwzględnieniem podziału litologicznego. Stwierdzono zmienność przestrzenną przepuszczalności dla poszczególnych horyzontów. Jednak tworząc parametryczne modele dubletów geotermalnych zróżnicowano przepuszczalność w poziomie (kierunki X i Y) oraz w pionie (kierunek Z) nadając tym ostatnim kierunkom wartości przepuszczalności dziesięciokrotnie mniejsze (tab. 7.5 i 8.5). W pracy nie natrafiono na uzasadnienie takich proporcji podziału.
- 2) W trakcie badań modelowych badano wpływ zmiany minimalnego kąta poligonalnej siatki obliczeniowej na estymowaną wielkość ciśnienia i temperatury w strefach przyotworowych dubletów. Przyjęty w efekcie kąt 30° jest kątem zoptymalizowanym czy sugerowanym standardowo przez używany program?

b) Uwagi natury technicznej

- 1) Charakteryzując obszary badań, w rozdz. 7.1 rozpatrzono tylko jedną jednostkę administracyjną – miasto Choszczno (s. 47), w rozdz. 8.1 natomiast wiele jednostek (gmin)(s. 115). Dlaczego?
- 2) Na profilach otworów (np. s. 128) widnieją zapisy *przepływ* oraz *przyływ*. Czy tak ma być?
- 3) W pracy zbyt często używany jest skrót *tj.*; przykładem może być s. 21. Nie zawsze wiadomo, czy oznacza on *to jest* czy *takie jak* (np. s. 21⁵) – w tym drugim przypadku zapis powinien brzmieć *t.j.* Przed tymi skrótami powinien być postawiony przecinek.
- 4) W tekstach naukowych nie powinno używać się skrótu *wg*, zwłaszcza na początku zdań (np. s. 27¹³). Dotyczy to także skrótu *w/g* (np. s. 141₁).
- 5) Często zamiast *ilość* (np. danych) powinno być *liczba*.
- 6) Elewacja *radomska* (s. 25₃) czy *radomszczańska* (s. 26¹⁰)?
- 7) Zdaniem recenzenta powoływane w podpisach rysunków nazwiska autorów powinny być odmieniane (nie np. *wg Stupnicka, 1997* – s. 30, ale *wg Stupnickiej*).
- 8) S. 9₃ – powinno być *Pruess i in., 2012*.
- 9) S. 122¹² – powinno być chyba *na północno-zachodni*.
- 10) Ujednolicić zapisy powołań literatury, np. *Sowizdzał i in.* zamiast *et al.* lub *&*.
- 11) Powołując w tekście wiele prac powinno wymieniać się je w kolejności alfabetycznej autorów lub według rosnących dat – ujednolicić w całej pracy.
- 12) S. 20₁ - powinno być *Dubrula, 2003*.
- 13) S. 58₆ – powinno być *Jaskowiak, 1966*.
- 14) S. 115⁸ – powinno być *Sowizdzał i in., 2013*.
- 15) brak w *Literaturze* prac powołanych w tekście: Sowizdzał, 2017 – s. 16₁₀; Deczkowski i in., 1997 – s. 30₂; Feldman-Olszewska, 1998 – s. 35⁹; Hajto, Górecki i in., 2010 – s. 37⁵.
- 16) brak powołania w tekście prac zamieszczonych w *Literaturze*: Dadlez, 1979, 1998; Dadlez i in., 1994; Gajewska, 1997; Szczepański i in., 2011; Sokołowski i Znosko, 1960; Teofilak-Maliszewska, 1967 oraz Wiktorowicz, 2011.

V. Zakończenie

Pomimo szeregu uwag, głównie nie merytorycznych, uważam, że praca mgr inż. Anny Wachowicz-Pyzik jest dysertacją, w której Doktorantka osiągnęła z powodzeniem założony cel. Wykazała się ona przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych oraz opanowaniem zastosowań w ramach wiedzy z zakresu geologii, geotermii, hydrogeologii, geofizyki, a także zastosowań metod modelowania matematycznego. Praca stanowi kolejny chlubny element w działalności krakowskiej szkoły hydrogeotermicznej, a równocześnie system geotermalny niecki szczecińsko-mogileńsko-łódzkiej uzyskał znaczące monograficzne opracowanie.

Uważam, że recenzowana praca spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Anny Wachowicz-Pyzik do dalszych etapów przewodu doktorskiego.