

Politechnika Wrocławska
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Katedra Górnictwa

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Elżbiety Hałaj pt.
**„Warunki występowania i możliwości wykorzystania wód i energii geotermalnej
z utworów mezozoicznych niecki mogileńsko-lódzkiej”**

Recenzja niniejsza powstała na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Nauki o Ziemi i Środowisku Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prof. dr. hab. inż. Jacka Matyszkiewicza z dn. 9.03.2022 r. (nr WGGiOŚ-dz.0154-72/2022).

I. Ogólna charakterystyka rozprawy

Na liczonych w dziesiątkach wykonanych dotąd przez recenzenta recenzji prac doktorskich opiniowana praca jest wykonana w nowy sposób – stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Stąd też liczy sobie ona jedynie 40 numerowanych stron maszynopisu, do których dołączone są w formie załączników (format A-4):

- kopie czterech artykułów – 74 str. (14+17+16+21 str.),
- dodatkowe ilustracje do jednego z artykułów – 21 str.,
- oświadczenia Autorki i współautorów o udziale w przygotowaniu publikacji – 4 str.

Tak więc cała praca liczy w sumie 135 merytorycznych stron. W tekście maszynopisu zamieszczono jeden rysunek i dwie tabele, a także spis literatury liczący 52 pozycje, do którego należy dodać jeszcze 200 pozycji zawartych w załączonych artykułach.

Cykl publikacji obejmuje cztery angielskojęzyczne pozycje:

1. Hałaj E., 2015 - *Geothermal bathing and recreation centres in Poland*. Environmental Earth Sciences, 74: 7497–7509. DOI 10.1007/s12665-014-3740-5 (Zał. 1);
2. Hałaj E., 2019 - *Characteristics and sustainable utilisation prospects of geothermal waters of the liassic formations in the Mogilno-Lodz Trough, Poland*. Sustainable Water Resources Management, 5: 1537–1553. DOI 10.1007/s40899-018-0235-7 (Zał. 2);
3. Hałaj E., Kępińska B., 2019 - *Conjunctive uses of the geothermal water resources from lower cretaceous formations in the Mogilno-Lodz trough, Poland*. Sustainable Water Resources Management, 5: 1479–1494. DOI 10.1007/s40899-018-0284-y (Zał. 3);
4. Hałaj E., Pająk L., Papiernik B., 2021 - *Simulation study of the Lower Cretaceous geothermal reservoir for Aquifer Thermal Energy Storage*. Environmental Geochemistry and Health, <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01130-7> (Zał. 4), wraz z Supplementary Materials opublikowanym wraz z tym artykułem.

Wszystkie czasopisma, w których zamieszczono powyższe artykuły wydawane są przez wydawnictwo Springer, a pierwsze i ostatnie posiadają znaczący *impact factor* (odpowiednio 2,867 i 4,677). Według bazy Web of Science artykuły te cytowane były już 16 razy.

Dwie z tych publikacji Doktoranta przygotowała samodzielnie, a w dwóch współautorskich Jej udział – według oświadczeń współautorów – wynosi aż po 80%.

W maszynopisowej części wprowadzającej przedstawionej rozprawy doktorskiej Autorka w dziewięciu rozdziałach przedstawiła cele pracy, podsumowanie treści zawartych w artyku-

łach oraz podsumowanie najważniejszych osiągnięć. Tekst ten spina w całość zawartości poszczególnych artykułów wykazując, że stanowią one rzeczywiście spójne rozwiązanie problemu naukowego.

II. Cel pracy

Podstawowym celem pracy według Doktorantki było „rozpoznanie warunków występowania wód i energii geotermalnej z utworów mezozoicznych niecki mogileńsko-łódzkiej”. Zdaniem recenzenta podany cel jest zbyt skromnie sformułowany – podobna ogólna tematyka stanowi przedmiot wielu wcześniejszych prac, z których najważniejszymi było kilka tematycznych kompleksowych atlasów. Jednak cel powyższy został w tekście uzupełniony siedmioma „szczegółowymi celami badawczymi” i w nich tkwi podstawowa „filozofia” pracy, według której poza rutynowym „rozpoznanie warunków występowania” celami pracy są:

- analiza dostępnych danych m.in. pod kątem ich uaktualnienia,
- analiza porównawcza parametrów wód z różnych rejonów niecki,
- rozpoznanie zmienności przestrzennej występowania wybranych parametrów wód (mineralizacji, temperatury, a także zawartości niektórych pierwiastków),
- analiza możliwości szerszego zrównoważonego i innowacyjnego wykorzystania wód i energii geotermalnej wraz z propozycją kierunków takiego wykorzystania,

a zwłaszcza

- opracowanie numerycznego modelu systemu magazynowania ciepła w warstwach wodonośnych przy uwzględnieniu stanu nasycenia (Saturation Index, SI) wody różnymi substancjami mineralnymi.

Dopiero one pokazują naukowy, indywidualny obraz zamierzeń pracy, a ponadto pozwalają na sformułowanie dwóch dodatkowych szczegółowych celów pracy, ale już o charakterze praktycznym:

- analiza zasadności wykorzystania wód i energii geotermalnej oraz
- określenie możliwości wprowadzenia magazynowania ciepła w warstwach wodonośnych niecki mogileńsko-łódzkiej.

III. Zastosowane metody badań

Cały schemat procesu badawczego Doktorantka przedstawiła w przejrzystej formie tabelarycznej w części maszynopisowej pracy (rys. 6.1). Można stwierdzić, że do osiągnięcia przedstawionych powyżej celów:

(Publikacja 1:)

- a) zdefiniowała przyjęte pojęcia ośrodka geotermalnego i basenu geotermalnego oraz określiła parametry wód i ośrodków rekreacyjnych;
- b) przeprowadziła analizę obecnego wykorzystania wód geotermalnych w 10 rekreacyjnych ośrodkach geotermalnych Polski na Podhalu i na Niżu Polskim;
- c) zebrała i zweryfikowała materiały archiwalne ze 191 odwiertów; do dalszego opracowania nadawały się tylko analizy chemiczne wód i dane o zasobach oraz warunkach geotermalnych z 29 i 40 otworów o głębokości ponad 1000 m (1000-3700 m) odpowiednio w utworach zbiornikowych jury dolnej oraz kredy dolnej niecki mogileńsko-łódzkiej;

(Publikacja 2 i 3:)

- d) w obrębie niecki mogileńsko-łódzkiej wydzieliła trzy strefy – nieckę mogileńską (na północy), nieckę łódzką (na południu) i strefę pośrednią;
- e) dla każdej z tych stref przyporządkowała składy chemiczne wód, wspierając się także wykresem Schoellera odrębnie dla utworów jury dolnej i utworów kredy dolnej;

- f) dla każdej z tych stref obliczyła wartości gradientów geotermicznych wspierając się dodatkowo krzywymi profilowań termicznych w sumie w 17 otworach, odrębnie dla utworów jury dolnej i utworów kredy dolnej;
- g) dla całej niecki wskazała na możliwość zrównoważonego wykorzystania wód i energii geotermalnej w zależności od temperatur, biorąc pod uwagę: systemy binarne, ogrzewnictwo, balneoterapia i rekreacja, odzyskiwanie pierwiastków, produkcja kosmetyków oraz magazynowanie energii geotermalnej;

(Publikacja 4:)

- h) wykonała modelowanie magazynowania ciepła w poziomie wodonośnym dolnej kredy w wybranym obszarze niecki łódzkiej symulując w nim cztery dublety składające się z otworów produkcyjnych i chłonnych, sprawdzając dodatkowo ewentualne wytrącanie się substancji mineralnych z wód w trakcie pracy tych zespołów.

Wszystkie zagadnienia zostały atrakcyjnie przedstawione w załączonych publikacjach, każdorazowo rozpoczynających się przeglądem odpowiedniej literatury, a także geologicznej i hydrogeologicznej charakterystyki regionu. Renoma czasopism zagwarantowała wysokie wymogi opublikowanych tekstów, w tym licznych map i wykresów.

Logiczne przedstawienie materiału rozprawy w poszczególnych publikacjach, w których został on szczegółowo przedyskutowany, pozwala na sformułowanie wniosków.

IV. Zalety pracy

Praca, której treści merytoryczne zawarte są w czterech odrębnych publikacjach, w sposób logiczny przedstawia możliwość zrównoważonego i innowacyjnego wykorzystania wód i energii geotermalnej niecki mogileńsko-łódzkiej przy selektywnym doborze licznych istniejących danych i ich odpowiedniej interpretacji wspomóżonej dodatkowo atrakcyjnymi badaniami własnymi z zakresu modelowania numerycznego i hydrogeochemicznego.

Doktorantka:

(Publikacja 1:)

- a) na tle ogólnej charakterystyki warunków geologicznych i geotermalnych niecki podhalańskiej i Niżu Polskiego scharakteryzowała dziesięć ośrodków geotermalnych przyjmując za kryterium wypełnienie rekreacyjnych basenów wodą geotermalną w ponad 50% objętości, a gdy woda posiada mineralizację większą niż 5 g/dm³ w objętości mniejszej;
- b) stwierdziła, m.in. uaktualniając dane, że wody w niecce podhalańskiej posiadają typ SO₄-Cl-Na-Ca lub SO₄-Cl-Ca-Na, ich mineralizacja nie przekracza 3 mg/dm³, a obszar ich występowania jest niewielki w porównaniu z Niżem Polskim. Wody geotermalne na Niżu charakteryzują się głównie typem Na-Cl i mineralizacją od bardzo wysokich do bardzo niskich. Zwróciła także uwagę na sprzyjające warunki geotermalne w Sudetach;

(Publikacja 2:)

- c) na tle geologicznym i hydrogeologicznym przedstawiła skład chemiczny wód geotermalnych warstw dolnej jury (prawie wyłącznie Na-Cl, M = 0,4-172 g/dm³), zwracając uwagę na zawartości w nich jodu, bromu i żelaza oraz ich zmienność z głębokością i rozmieszczeniem przestrzennym w wydzielonych trzech strefach – północnej, przejściowej i południowej;
- d) przedstawiła parametry termiczne wód dolnej jury; przy stopniu geotermicznym zmieniającym się w granicach 1,82-3,13°C/100 m i przy średniej 2,4°C/100 m, temperatury wód zmieniają się od 31,1°C na głębokości 966 m do 105°C na głębokości 3364 m;
- e) rozpatrzyła możliwość zrównoważonego wykorzystania wód i energii geotermalnej w kaskadowym systemie: produkcji prądu elektrycznego w instalacjach binarnych (>80°C), ogrzewnictwie (ok. 65°C), balneoterapii (>28°C), odzysku surowców mineralnych oraz magazynowania ciepła (tylko w południowej części niecki mogileńsko-łódzkiej);

(Publikacja 3:)

- f) na tle geologicznym i hydrogeologicznym przedstawiła skład chemiczny wód geotermalnych warstw dolnej kredy (prawie wyłącznie Na-Cl, $M = 0,2-100,8 \text{ g/dm}^3$), zwracając uwagę na zawartości w nich jodu, bromu i żelaza oraz ich zmienność z głębokością i rozmieszczeniem przestrzennym w wydzielonych trzech strefach. Należy tu podkreślić, że w przypadku wód o najniższej mineralizacji – do $0,5 \text{ g/dm}^3$ – wody posiadają typ Na-(Ca)-(Cl)- HCO_3 ;
- g) przedstawiła parametry termiczne wód dolnej kredy; przy stopniu geotermicznym zmieniającym się w granicach $1,8-3,2^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ i przy średniej $2,5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, temperatury wód zmieniają się od $17,9^\circ\text{C}$ do $82,9^\circ\text{C}$ na głębokości 2435 m;
- h) rozpatrzyła możliwość zrównoważonego wykorzystania wód i energii geotermalnej w kaskadowym systemie: produkcji prądu elektrycznego w instalacjach binarnych (brak perspektyw), ogrzewnictwie (ok. 65°C), balneoterapii ($>28^\circ\text{C}$), odzysku surowców mineralnych (I, Br, K, Mg), a także magazynowania ciepła (tylko w południowej części niecki mogileńsko-tódzkiej);

(Publikacja 4:)

- i) wykazała, że warstwy dolnej kredy południowej części niecki (okolice Tuszyna) mogą być wykorzystane jako magazyny ciepła w warstwach wodonośnych (ATES). Doszła do tego wniosku po przeprowadzeniu obliczeń metodą elementów skończonych programem Feflow, wykorzystując model geologiczny sporządzony przez dra B. Papiernika. Parametry hydrauliczne i termiczne zastosowane w modelu przyjęto z prac S. Plewy, W. Góreckiego oraz J. Małeckiego i in. Przyjmując cztery dublety i zakładając dla nich różne temperatury zatłaczanych i wydobywanych wód wykazała, że najlepsze rezultaty przy współczynniku odzysku ciepła 0,47 i 0,34 uzyskuje się przy różnicy temperatur wód 30 K i 40 K. Wydajności cieplne dubletów dla różnych sytuacji w ciągu trzydziestoletniej ich eksploatacji zilustrowano aż 21. rysunkami;
- j) przy przyjętych wyżej parametrach wykazała dzięki modelowaniu hydrogeochemicznemu, że w takich magazynach ciepła nie ma zagrożenia wytrącaniem się z roztworów krzemionki, chalcodonu i anhydrytu, natomiast mogą wytrącać się aragonit i kalcyt.

Reasumując, praca ma znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne, co sformułowane zostało w celach szczegółowych pracy. Rozpatrywane zagadnienia zostały rozmieszczone w czterech publikacjach i zostały zgrabnie zaprezentowane, omówione i podsumowane w części maszynopisowej rozprawy; ta część podzielona jest na rozdziały w sposób przejrzysty, napisana jest bardzo ładnym stylem i łatwo się ją czyta. Uwagę zwraca wykonana adiustacja językowa. Wysoką jakość tekstów załączonych artykułów zapewniły redakcje poszczególnych czasopism, dodatkowo po uwzględnieniu uwag wielu recenzentów z różnych krajów.

Stąd też nie mam do pracy uwag merytorycznych, a w całej pracy udało mi się tylko znaleźć dwie bardzo drobne uwagi redakcyjne:

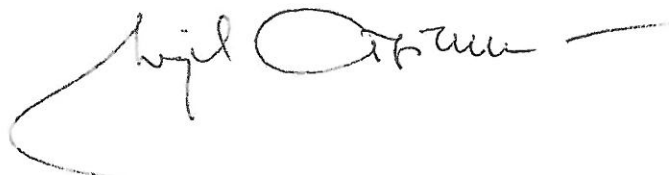
- w publikacji 1 (s. 7499) powierzchnię obszaru zasilania w Tatrach podhalańskiego systemu geotermalnego oszacowano tylko na ok. 350 m^2 ;
- w publikacji 3 (s. 1480 i 1493) powinno być powołanie na pracę Hałaj (2019), a nie (2018).

V. Zakończenie

Uważam, że praca mgr inż. Elżbiety Hałaj jest dysertacją, w której Doktorantka osiągnęła z powodzeniem założone cele, przedstawiając tym samym oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Wykazała się Ona przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych oraz opanowaniem zastosowań wiedzy z zakresu geologii, hydrogeologii, geotermii, hydrochemii,

a także w zakresie modelowania hydrogeochemicznego i geotermicznego. Nieczęsto się zdarza, że dorobek publikacyjny osoby realizującej doktorat posiada już *index Hirscha* 4, a współautorstwo publikacji Doktorantki wskazuje na Jej umiejętność współpracy z zespołami autorów. Należy zwrócić uwagę, że liczba cytowań (wg bazy Web of Science) wszystkich prac dr inż. Elżbiety Hałaj w chwili złożenia dokumentów wynosiła - jak już wspomniano - 16, a w chwili pisania niniejszej recenzji wzrosła już do 21. Tak więc recenzowana praca stanowi kolejny chlubny element w działalności krakowskiej szkoły hydrogeotermicznej.

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Elżbiety Hałaj do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Wojciech Ortuń". The signature is written in a cursive, flowing style with a long horizontal stroke extending to the right.