

Warszawa 1.08.2023 r.

Prof. dr hab. Jerzy J. Małecki  
Katedra Geologii Inżynierskiej i Geotechniki  
Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Bartłomieja Ciapały pod tytułem: *Potencjał geotermalny wód ze zbiorników mezozoicznych i kenozoicznych niecki lubelskiej w zależności od sposobu energetycznego zagospodarowania ich zasobów.*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Ciapały przygotowana została na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 4 lipca 2023”.

Badania dotyczące oceny wielkości zasobów geotermalnych bazujących na wykorzystaniu czynników przyrodniczych oraz analizie zapotrzebowania na ciepło zajmują ważny obszar w geologii złożowej dotyczącej surowców energetycznych, geologii środowiskowej oraz w szeroko pojętych zagadnieniach z zakresu hydrogeologii i ochrony środowiska.

Szczególnie intensywnie badania dotyczące geotermii powinny być prowadzone w obszarach występowania struktur geologicznych, sprzyjających gromadzeniu się podziemnych wód termalnych. Niewątpliwie takim obszarem jest subregion środkowej Wisły w części wschodniej Wyżyny Lubelskiej.

Badania, w nurt których wpisuje się recenzowana rozprawa, oprócz rozwiązywania problemów naukowych dotyczących rozpoznania warunków występowania wód geotermalnych na obszarze niecki lubelskiej, mają również istotne znaczenie użytkowe, upowszechniając /promując/ wykorzystanie ciepła geotermalnego. Temat badań prezentowany w recenzowanej rozprawie doktorskiej jest interdyscyplinarny, stworzył on Autorowi konieczność działań w wielu kierunkach nauk geologicznych, w tym głównie w geologii złożowej surowców energetycznych i hydrogeologii. Oprócz podstawowych ocen wyników badań przyrodniczych Autor

przeprowadził klasyfikację sieci ciepłowniczych, gęstości zabudowy, zapotrzebowania na ciepło, wpływu zmian klimatu na potencjał geotermalny.

Moim zdaniem, w dotychczasowych opracowaniach dotyczących potencjału geotermalnego wód podziemnych udział rozpoznania hydrogeologicznego jest niewystarczający, dlatego w recenzowanej pracy główny nacisk położyłem na sposób i interpretację danych hydrogeologicznych.

Temat omawianej rozprawy, kierunek przeprowadzonych badań oraz sposób rozwiązywania stawianych problemów jest interesujący, a w części dotyczącej oceny potencjału geotermalnego odwiertu studziennego wręcz nowatorski (zastosowanie metod modelowania z wykorzystaniem sieci neuronowej dla oceny współczynnika obciążenia CF).

W skład recenzowanej rozprawy doktorskiej wchodzi dwa artykuły wieloautorskie i samodzielny artykuł doktoranta oraz omówienie i synteza uzyskanych wyników. Udział doktoranta we wskazanych artykułach jest wyraźnie określony oświadczeniem współautorów, a jego własna rola w prezentowanych pracach jest wiodąca.

W załączonych artykułach skala rozpoznania regionalnego dotyczącego odnawialnych źródeł energii ulega zmianie - od ocen globalnych dotyczących całej Polski do ocen regionalnych dotyczących regionu niecki lubelskiej.

W pierwszym, wieloautorskim artykule oceniono i określono ilościowo długoterminowe zmiany trendów temperatury, które wpływają na działanie OZE i krajowego zapotrzebowania na moc. Wykazano, że średnia dobową temperaturą we wszystkich większych miastach Polski wzrastała o ok. 0,52°C na dekadę, a obserwowany wzrost temperatury powietrza zmniejszył zapotrzebowanie na ciepło, w tym na zaopatrzenie z odnawialnych źródeł energii. Tematyka tego artykułu jest jedynie pośrednio wprowadzeniem do zagadnień, którym poświęcone są kolejne dwie prace, w których doktorant w sposób szczegółowy podejmuje badania dotyczące potencjału geotermalnego wód podziemnych na przykładzie niecki lubelskiej. We wstępie do tych opracowań zabrakło szerszego przedstawienia kryteriów wyboru obszaru badań do omawianego w pracy audytu geotermalnego, szczególnie zabrakło wyboru kryteriów przyrodniczych.

Kolejny artykuł dokumentuje hipotezę, że klimat pozostaje głównym czynnikiem wpływającym na efektywne wykorzystanie zasobów geotermalnych, a warunki klimatyczne ułatwiają wykorzystanie energii geotermalnej w niecce lubelskiej. Bardzo istotnym użytecznym wnioskiem tej pracy jest stwierdzenie, że unormowania prawne



dotyczące ciepła projektowanego są zbyt restrykcyjne, szczególnie w planach dotyczących domów jednorodzinnych. Ze względu na stabilność i przewidywalność zużycia ciepła rozwój ciepłownictwa geotermalnego jest szczególnie predysponowany w obszarach miejskich, w których niskotemperaturowe zasoby geotermalne dostępne w niecce lubelskiej mogą być efektywnie eksploatowane.

Licząc współczynnik obciążenia odwiertu (CF) autor przedstawił gradację czynników decydujących o jego wartości, nawiązując między innymi do oczekiwanej efektywności ekonomicznej odwiertu. W ocenach minimalnej akceptowanej wartości współczynnika CF istotnym byłoby uwzględnienie cen energii uzyskiwanych z innych źródeł, w tym również ze źródeł konwencjonalnych.

Trzeci samodzielny artykuł wchodzący w skład recenzowanej rozprawy doktorskiej pod tytułem „Geothermal Potential of the Lublin Trough is Low-temperature and North-concentrated. What May Be Environmental Impact of Their Use?” stanowi podstawę recenzowanej rozprawy. Został wnikliwie omówiony w sumarycznym opisie osiągnięć doktoranta.

Autor we wstępie opisu do tego artykułu w sposób jasny i merytorycznie uzasadniony formułuje hipotezy badawcze, które w dalszej części pracy w sposób konsekwentny dokumentuje i uzasadnia wynikami prezentowanych badań. Na podkreślenie zasługuje starannie wykonany opis rezultatów badań wraz z załącznikami graficznymi i tabelami, który ze względu na ograniczenia wydawnicze nie mógł być w takiej formie zamieszczony w artykułach.

Z dużym zadowoleniem przyjąłem złożoną przez Autora we wstępie pracy deklarację, według której termin (zgodnie z prawem geologicznym i górnictwem) „wody termalne”, zastępuje sformułowaniem wody geotermalne. O taką zmianę terminologii zabiegał już w drugiej połowie ubiegłego wieku profesor Julian Sokołowski, definiując energię geotermalną jako energię cieplną zgromadzoną w wodach lub parach wodnych wypełniających puste przestrzenie skał, a jej użyteczność, dla celów praktycznych wiązała z temperaturą, która powinna być wyższa od otoczenia. W Polsce za temperaturę graniczną odróżniającą wody zwykłe od termalnych przyjęto wartość 20°C na wypływie. Należy jednak zaznaczyć, że już wody o temperaturze powyżej 4 °C mogą być wykorzystywane jako źródło ciepła transformowanego przez pompy ciepła.



Oceniając całość rozprawy doktorskiej należy stwierdzić, że charakterystyka geologiczna i hydrogeologiczna terenu badań przedstawiona jest w sposób bardzo lakoniczny i skrótowy, jednak najistotniejsze informacje niezbędne do dalszych ocen zostały zamieszczone.

Do oceny potencjału geotermalnego niecki lubelskiej Autor wykorzystał modelowanie geologiczne oraz analizy GIS, jednocześnie szacując możliwe do uzyskania potencjalne ograniczenie zanieczyszczenia powietrza w porównaniu do spalania węgla i gazu ziemnego. Perspektywiczne obszary, w których bezpośrednio występuje dostępność wód geotermalnych i wystarczające zapotrzebowanie na ciepło geotermalne to głównie północna część niecki lubelskiej oraz obszary w pobliżu głównych stref uskokowych. Wizualizacja zasięgu zbiorników wód geotermalnych w omawianym obszarze w interwałach głębokościowych od 400 do 1800 m ppt. jest jednym z głównych regionalnych osiągnięć doktoranta.

Definiując obszar badań, w pracy niezbyt precyzyjnie określono północno-zachodnią granicę badanego terenu. Granica ta powinna być szczególnie jednoznacznie zdefiniowana, gdyż pełni istotną rolę w rejonizacji hydrogeologicznej. Z powodu braku wyraźnych granic tektonicznych wskazanym byłoby, nawiązując do granic hydrodynamicznych stref zasilania i drenażu wód podziemnych, wykorzystać kartografię hydrogeologiczną (np.: MhP 1:50000 czy granice GZWP, JCWPd, które przecież Autor prezentuje na rys. 3, wykorzystując je przy wyznaczeniu granicy wschodniej). Brak wyznaczenia granicy zachodniej na podstawie przesłanek przyrodniczych oraz rozszerzenie modelu geologicznego, wiązało się z interpretacją potencjału geotermalnego zbiorników mezozoicznych i kenozoicznych niecki lubelskiej, łącznie z wodami w utworach paleogeńsko-neogeńskich subniecki warszawskiej i z wodami czwartorzędowymi doliny środkowej Wisły, co wykracza poza deklarowany w tytule obszar badań.

Oceniając rolę dyslokacji tektonicznych, w pracy zabrakło szerszego nawiązania do wykształcenia litologicznego wodonośca. W skałach litych odpornych na wietrzenie np.: gęzy, opoki, strefy uskokowe tworzą uprzywilejowane drogi filtracji, natomiast drożność stref tektonicznych zasadniczo maleje np.: w marglach, gdzie zwietrzelina w strefie spękań doprowadza do tworzenia się barier izolujących hamujących przepływ wód podziemnych.



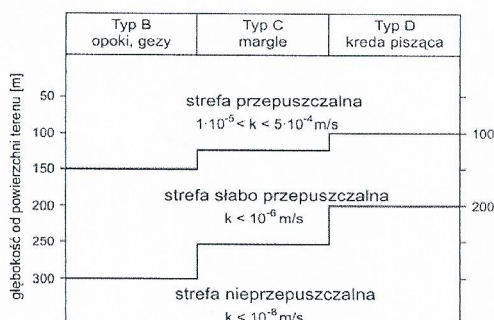


Fig. 7.48. Głębokość zawodnienia dla wyróżnionych typów litologicznych (S. Krajewski, J. Motyka, 1999)

W spisie literatury wykorzystanej w pracy zabrakło odniesień do Hydrogeologii regionalnej Polski tom 1, szczególnie odniesień do rozdziału 7.2.3, dotyczącego Wyżyny Lubelskiej (prezentowany powyżej rysunek pochodzi z tego opracowania).

W odwzorowaniach graficznych przepuszczalności utworów oraz w rozkładzie temperatur (rys. 7, rys. 8) zastanawiającym jest fakt dlaczego strefy uskokowe, które na głębokości kilkuset metrów są głównymi drogami filtracji wód, nie zaburzają liniowego rozkładu omawianych parametrów? Sądzę, że może to wynikać ze skali rysunku, która notabene, jest trudna do określenia (brak jednostek)?

Na podstawie uzyskanych danych prezentowane prognozy, dotyczące możliwości wykorzystania wód geotermalnych w energetyce ciepłej omawianego regionu mają, co zgodnie podkreśla Autor, charakter szacunkowy. Decydujące znaczenie w ich ocenie, zdaniem recenzenta, mają parametry hydrogeologiczne warstw wodonośnych, ich porowatość efektywna oraz przewodność hydrauliczna. O odnawialności zasobów energii geotermalnej możemy mówić jedynie w przypadku zachowania równowagi hydrodynamicznej między poborem wody a zasilaniem zbiornika. Szacunki zasobów energii, bazujące na zawartości wody w skale, oparte jedynie na ocenie porowatości, są często zawyżone. Zakłada się w nich nieograniczoną możliwość wydobycia wody bez uwzględnienia odnawialności wód czy odsączalności skał wodonośnych. Autor oceniając zasoby dostępnej energii geotermalnej z wód bazował, tak jak zasadnicza większość dotychczas wykonanych podobnych obliczeń, na zasobach statycznych wód podziemnych. Interesujące byłoby porównanie wyników zasobów energii geotermalnej obliczonych z wykorzystaniem zasobów statycznych i porównanie ich z wynikami uzyskanymi w oparciu o zasoby dynamiczne wód podziemnych. Jest to stosunkowo nowa tematyka badań,

wymagająca dodatkowo stworzenia modelu numerycznego jednostki hydrogeologicznej. Uważam, że rozwój badań nad wykorzystaniem wód geotermalnych powinien rozwijać się w tym kierunku, a doktorant powinien kontynuować tego typu badania wykorzystując zdobytą wiedzę oraz bazując na już zgromadzonych danych z obszaru niecki lubelskiej. Na obecnym etapie prowadzonych prac zabrakło mi w dysertacji chociażby teoretycznej dyskusji w odniesieniu do tych zagadnień, szczególnie roli modelowania numerycznego, bazującego na schematach koncepcyjnych krążenia wód podziemnych w określeniu zasobów dyspozycyjnych zbiorników wód termalnych czy zasobów eksploatacyjnych projektowanych ujęć geotermalnych.

W rozdziale dotyczącym szacowania ocen wydatków studni zabrakło odniesień do stref sztucznego drenażu obejmujących obszary odwodnień związane z eksploatacją złóż węgla kamiennego oraz wapieni kredy lubelskiej.

Oceniając możliwości przepływu wód podziemnych Autor bazował głównie na wartościach współczynnika przepuszczalności badanych utworów. W opisie pracy zabrakło odniesień do przewodności analizowanych warstw wodonośnych, chociaż pośrednio w obliczeniach Autor uwzględnił miąższość utworów wodonośnych przy ocenie wydajności otworu eksploatacyjnego. Do wyjaśnienia pozostaje kwestia czy w artykule (Ciapała, 2023) Autor prawidłowo zatytułował zamieszczone mapy jako mapy przewodności hydraulicznej ? Zgodnie z definicją, przewodność warstwy wodonośnej ( $T = k m$ ) jest liczbowo równa iloczynowi współczynnika filtracji i miąższości warstwy wodonośnej jednorodnej i izotropowej (Słownik Hydrogeologiczny 2002).

W pracy zabrakło weryfikacji obliczonego analitycznie współczynnika filtracji  $k$  (m/s) na podstawie średnich wartości współczynnika przepuszczalności  $k_p$  ( $m^2$ ), mineralizacji  $M_s$  ( $kg/m^3$ ), gęstości  $\alpha_w$  ( $kg/m^3$ ) i temperatury wody geotermalnej  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ) z wartościami współczynnika filtracji  $k$  uzyskanymi empirycznie z próbnymi pompowań. Porównanie pozwoliłoby na pełniejszą ocenę wiarygodności map wynikowych obszarów perspektywicznych dla eksploatacji zasobów geotermalnych.

Obliczenia przepuszczalności hydraulicznej (mD) wykonano na podstawie modelu porowatości; istotną przy ocenie uzyskanych wyników byłaby informacja co do rodzaju porowatości, czy była to porowatość całkowita czy porowatość efektywna



otwarta na drogi filtracji wód. W całym opracowaniu tylko raz użyto sformułowania porowatość zamknięta - dotyczyło to opok z interwału głębokości 1600 – 2000 metrów.

Tworząc model termiczny niecki lubelskiej autor zastosował poprawkę związaną z przegrzewaniem i przechładzaniem odwiertu w wyniku cyrkulacji płuczki. Związane jest z tym pytanie czy dane termiczne wprowadzane do modelu uzyskiwane były zawsze w tym samym okresie wiercenia czy również po zafiltrowaniu i wstępnej eksploatacji otworu studziennego?

Omawiając zmienność temperatury w profilu pionowym autor dokumentuje w strefach Łuków-Łosie i Izbica-Zamość anomalie termiczne, tłumacząc ich obecność, między innymi, intruzjami magmowymi. Omawiany obszar, jak sam autor stwierdza we wprowadzeniu do pracy, jest jednym z lepiej rozpoznanych geologicznie obszarów Polski (liczne wiercenia w ramach rozpoznania LZW), nasuwa się pytanie na jakiej podstawie i w jakich opracowaniach autor spotkał się z udokumentowanymi intruzjami magmowymi w tym obszarze, które pozwalają na formułowanie takiej hipotezy ?

Istotnymi osiągnięciami recenzowanej pracy są:

- opracowania graficzne, które można wykorzystać w projektowaniu systemów ciepłowniczych bazujących na niskotemperaturowych zasobach geotermalnych w obrębie niecki lubelskiej,

- udokumentowanie zależności, że zwiększenie stopnia schłodzenia zwiększa potencjał geotermalny złóż, równocześnie określenie fizycznej granicy schładzania, przy której gęstość wody osiąga maksimum,

- wskazanie obszarów do prowadzenia działalności rekreacyjnej lub usług publicznych wykorzystujących geotermię do ogrzewania i chłodzenia,

- wykazanie, że stworzenie wysokotemperaturowych instalacji ciepłowniczych zasilanych centralną pompą ciepła jest mało prawdopodobne w niecce lubelskiej,

- wskazanie obszarów rozluźnień tektonicznych jako perspektywicznych dla eksploatacji wód geotermalnych oraz udokumentowanie, że systemy ciepłownicze bazujące na sieciach super niskotemperaturowych umożliwią większy dostęp do niewykorzystanej energii geotermalnej, która jest nieosiągalna dla średnio i wysokotemperaturowych systemów ciepłowniczych.

Wykonane w ramach pracy odwzorowania graficzne i na ich podstawie sformułowane wnioski ogólne, stanowią schemat postępowania pozwalający zastosować je nie tylko w rejonie niecki lubelskiej, ale również w innych obszarach o podobnych cechach klimatycznych, budowie geologicznej i warunkach hydrogeologicznych. Jest to niewątpliwie postęp w promowaniu wykorzystania zasobów geoenergii wód podziemnych.

Reasumując, zakres i sposób prezentacji wyników wskazuje na rozległą wiedzę jaką posiada doktorant w zakresie problematyki pozyskiwania energii geotermalnej z wód podziemnych. Sygnalizowane w recenzji uwagi w głównej mierze mają charakter dyskusyjny i nie obniżają w sposób istotny wartości pracy. Autor wykazał się dobrą znajomością przedmiotu badań, umiejętnością interpretacji zebranych materiałów, dostrzeganiem i rozwiązywaniem problemów badawczych.

**Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz spełnia warunki stawiane rozprawie doktorskiej w rozumieniu ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r. poz.1789 oraz art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r.) Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Ciapały do publicznej obrony rozprawy doktorskiej na temat „Potencjał geotermalny wód ze zbiorników mezozoicznych i kenozoicznych niecki lubelskiej w zależności od sposobu energetycznego zagospodarowania ich zasobów.”.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Henryk P. ...' followed by a stylized flourish.