

dr hab. inż.

Kraków, 31.08.2018 r.

Maria Ciechanowska – prof. INiG–PIB

Instytut Nafty i Gazu

– Państwowy Instytut Badawczy

## Recenzja

### rozprawy doktorskiej mgra Rafała Kudrewicza

pt. Spatial distribution of the selected parameters of the terrestrial thermal field within the Polish Carpathians and the Carpathian Foredeep

Recenzja została wykonana na podstawie decyzji Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH z dnia 25.06.2018 r. o powołaniu mnie na recenzenta ww. rozprawy oraz zlecenia Dziekana Wydziału z dnia 05.07.2018 r. dotyczącego wykonania recenzji.

#### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgra Rafała Kudrewicza pt. „Spatial distribution of the selected parameters of the terrestrial thermal field within the Polish Carpathians and the Carpathian Foredeep” została napisana pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Wojciecha Góreckiego, na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, w Katedrze Surowców Energetycznych.

Rozprawa obejmuje 101 stron i zawiera 5 rozdziałów oraz wnioski. Została napisana w języku angielskim. W pracy zamieszczono dwujęzyczne streszczenie oraz alfabetyczny wykaz cytowanej literatury, a także 53 rysunki i 2 tabele. Rozprawa została przygotowana w sposób zrozumiały, przejrzysty i niezwykle staranny.

W wykazie literatury ujęto 94 pozycje, przy czym zawiera on zarówno te opublikowane współcześnie w renomowanych czasopismach naukowych, jak i pozycje polskich badaczy – prekursorów tematyki badań i interpretacji rozkładu pola geotermicznego na obszarze Polski i nie tylko. Ponad 50% pozycji dotyczy prac wydanych do roku 2000, w tym także opublikowane m.in. w roku: 1904, 1910, 1924 czy 1954.

W pracy przedstawiono wyniki trójwymiarowego modelowania parametrów ziemskiego pola termicznego dla obszaru Karpat i zapadliska przedkarpackiego, z uwzględnieniem temperatury, gradientu geotermicznego i stopnia geotermicznego.

Podstawą modelowania był zbiór profilowań temperatury PT udostępniony przez PGNiG SA (dane z ok. 380 otworów wiertniczych) i uzupełniony danymi z PIG-PIB i AGH.

- Pomiaru PT w otworach, ujęte w ww. zbiorze, wykonano w większości przypadków w okresie do roku 2001. Były to zarówno profilowania zrealizowane w warunkach stacjonarnych (co najmniej po kilkudniowej stójce otworu, gdy płuczka przyjmuje temperaturę skał otaczających), jak i w warunkach niestacjonarnych, gdy profilowanie PT bardziej odzwierciedla temperaturę płuczki niż skał na danej głębokości. Danych temperaturowych pomierzonych w warunkach stacjonarnych jest jednak niewiele. Przeważają pomiary w warunkach nieustalonych, przy czym w istotnej grupie otworów profilowania PT prowadzono tylko na odcinku 50 m w dolnej części otworu.

Tak niejednorodny zbiór danych wymagał od Doktoranta metodycznego, dobrze przemyślanego podejścia, by dla profilowań PT wykonanych w warunkach nieustalonych wprowadzić odpowiednie korekty/procedury przetwarzania tak, aby można je było w konsekwencji odnieść do warunków ustalonej równowagi termicznej otworu. Po analizie różnych metod, Autor wybrał, jako najbardziej optymalną, metodę Kukkonena-Szewczyka, przetestowana już w polskich warunkach. W ten sposób przygotowany zbiór danych nadawał się dopiero do modelowania.

- Przeprowadzono przy użyciu oprogramowania PETREL Firmy J. Schlumberger, proces modelowania przestrzennego parametrów termicznych, w interwale od powierzchni Ziemi do głębokości przebiegu izotermy 160°C. Wynikiem tych prac było uzyskanie szeregu map i przekrojów, w tym m.in.:
  - map obrazujących zmianę temperatury, gradientu geotermicznego i stopnia geotermicznego dla przyjętego do analizy obszaru Karpat i zapadliska przedkarpackiego, dla określonych interwałów głębokościowych, horyzontów głębokościowych i poziomów strukturalnych. Na mapach przedstawiono także zmiany średniego gradientu geotermicznego czy interwałowych gradientów geotermicznych.
  - przekrojów wykonanych wzdłuż 4 linii prostopadłych i 1 równoległej do granicy nasunięcia karpackiego, obrazując zmianę parametrów pola termicznego z przebiegiem ww. linii.
- Wykonano analizę wyników modelowania, zwracając szczególną uwagę na korelację zmienności gradientu geotermicznego z danymi geologicznymi (w tym m.in. z wykształceniem litologicznym czy facjalnym), a także z występowaniem złóż węglowodorów.
- Sformułowano wnioski wynikające z pracy, potwierdzające hipotezę postawioną w niej o wielowymiarowej zmienności własności termicznych litosfery.

Wytyczono dalsze kierunki badań wykorzystując wiedzę i doświadczenie zdobyte przy realizacji rozprawy.

## 2. Ocena merytoryczna

Doktorant podjął się realizacji tematyki badawczej, związanej z polem cieplnym litosfery na podstawie danych pochodzących z bardzo długiego okresu czasu, prawie 65 lat (1950–2015). Stało się to możliwe dzięki niezwykle rozwojowi informatyki, w tym i oprogramowania.

Etap I. Należy mieć świadomość, że pomiary temperatury były wykonywane różnymi termometrami, otwory wiercono różnymi płuczkami, także okresy stójki otworu były różne. Stąd też właściwe podejście do danych temperaturowych miało kluczowe znaczenie.

Sam sposób określenia czasu, po którym następuje równowaga cieplna w otworze jest teoretycznie prosty, a w rzeczywistości mało realny. Dotyczy on okresu, po którym nie stwierdza się dalszych zmian temperatury płuczki w otworze wiertniczym, co oznacza, że płuczka przyjęła temperaturę skał otaczających. Ale w przyrodzie takie oczywiste zjawiska rzadko występują. Wcześniejsze prace terenowe wskazywały, że okres stabilizacji powinien wynosić nie mniej niż 10 dni, w innych przypadkach 14-15 dni. Natomiast pomiary wykonane zupełnie w innych celach badawczych nawet po miesiącu ujawniały, że procesy wiertnicze w dalszym ciągu oddziaływały na ośrodek, jakim jest otwór wiertniczy, choć w zdecydowanie mniejszym zakresie. A zatem ustalenie równowagi cieplnej, choć ma priorytetowe znaczenie, dokonywane jest z pewnym przybliżeniem. Zaburzenia temperatury wprowadzają także czynniki powierzchniowe, ruch wód podziemnych, czy rzeźba terenu.

Stąd też wprowadzenie odpowiednich korekt do profilowań PT, by można było uznać tworzony zbiór danych za względnie jednorodny i wiarygodny, a także porównywalny było koniecznością.

Oceniam, że ten etap pracy przygotowania zbioru danych do modelowania, choć był niezwykle trudny, został zrealizowany bardzo profesjonalnie.

Etap II. Modelowanie pola cieplnego wykonano dla obszaru Karpat i zapadliska przedkarpackiego według określonego planu, tworząc cały szereg map i przekrojów zmian parametrów termicznych dla różnych interwałów głębokościowych, czy poziomów. Mapy te mają bezwzględnie znaczenie użytkowe, niezależnie od tego, że stanowią element badań podstawowych. Powinny one być zastosowane przy modelowaniu i analizach systemów naftowych. Właściwości termiczne skał oraz rozkłady temperatur z głębokością oddziałują bowiem bezpośrednio na stopień przeobrażenia substancji organicznej, kontrolujących procesy generacji, migracji i akumulacji węglowodorów. Takie czynniki, jak właśnie temperatura i czas odgrywają kluczową rolę w dojrzewaniu ww. substancji.

Etap III. Wyniki modelowania przestrzennej zmienności przede wszystkim stopnia geotermicznego zostały skorelowane m.in. z budową geologiczną (z wykształceniem litologicznym, facjalnym, czy z tektoniką obszaru). Autor przedstawił na kolejnych mapach korelację gradientu geotermicznego dla różnych interwałów głębokościowych.

Uważam, że dla wykorzystania utylitarnego większe znaczenie miałyby obliczenia gradientu geotermicznego dla określonych poziomów litostratograficznych. Ich wykształcenie bezwzględnie ma wpływ na wielkość tego gradientu, poprzez wydzielane przez skały ciepło radiogeniczne, które obok ciepła generowanego pośrednio z płaszczą Ziemi, jest głównym źródłem strumienia ciepłego Ziemi.

Ciepło radiogeniczne jest ściśle związane, zwłaszcza w skałach osadowych, z zawartością pierwiastków promieniotwórczych. Ich podwyższona ilość towarzyszy zwykle minerałom ilastym, także w substancji organicznej często występują związki uranu.

I tak np. średni gradient geotermiczny dla otworu Bańska IG-1 wynosi  $2,11^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , natomiast gradienty odpowiadające poszczególnym interwałom litostratograficznym zmieniają się od  $1,45$  (wapień Fliszu Podhal.) do  $2,62^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (utwory piaskowcowo-ilasto-mułowcowe Fliszu Podhal.).

Po analizie całości pracy, największe znaczenie przypisałabym nie modelowaniu, którego wyniki i ich korelacje bezsprzecznie stanowią kwintesencję rozprawy i jej godne podsumowanie, ale etapowi I związanemu z przygotowaniem danych i utworzeniem zbioru dla modelowania. Jeszcze raz podkreślę, że były to dane pochodzące z okresu ponad 65 lat, czy mierzone w różnych standardach. Jeśli takie procedury zostały opracowane i przetestowane to będą one stanowić podstawę szeregu dalszych prac badawczych i rozwojowych, nie tylko dla potrzeb górnictwa naftowego, ale także dla wspierania rozwoju geotermii w kraju. Ciepło Ziemi zostało umieszczone w grupie surowców energetycznych i taki wysoki status znalazł odzwierciedlenie w projekcie „Polityki Surowcowej Państwa”.

Odnosząc się do przedstawionego w rozprawie wykazu literatury to oceniam go pozytywnie, chociaż z pewnym wyjątkiem. Doktorant przedstawił swój wkład w rozwój polskiej geotermii na tle osiągnięć poprzednich pokoleń geologów, geofizyków czy eksploatorów, którzy stworzyli podwaliny pod ewolucję tej dziedziny nauki. W ostatnich czasach nie jest to typowe podejście w pracach naukowych i świadczy o właściwym poziomie etycznym Doktoranta.

Natomiast odczuwam niedosyt najnowszych światowych pozycji literaturowych i odniesienia do nich krajowych osiągnięć lub braków w tym zakresie.

Bardzo pozytywnie oceniam także zaproponowane przez Doktoranta kierunki dalszego rozwoju tematyki rozprawy na inne rejony i w poszerzonym zakresie. Wskazuje to na zaangażowanie Autora w pracę badawczą i potwierdza, że zawsze istnieje „pewien niedosyt” z nią związany.

## Podsumowanie

Podsumowując uważam, że Doktorant przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dziedzinie nauk o Ziemi, w dyscyplinie: geologia. Dowiódł wystarczających kompetencji do samodzielnego prowadzenia badań naukowych, do formułowania celu, tematyki i zakresu tych badań oraz doboru właściwego warsztatu dla eksploracji pola termicznego Ziemi.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgra Rafała Kudrewicza pt.

“Spatial distribution of the selected parameters of the terrestrial thermal field within the Polish Carpathians and the Carpathian Foredeep”

spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk o Ziemi, w rozumieniu Ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14.03.2003 r. (wraz z późniejszymi zmianami, w tym DZ.U.2017 r., poz. 859) i wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

