

dr hab. inż. Piotr Krzywiec, prof. nadzw. ING PAN
Instytut Nauk Geologicznych PAN
ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa
email: piotr.krzywiec@twarda.pan.pl

Warszawa, 2018/08/27

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr Rafała Kudrewicza zatytułowanej
„Spatial distribution of the selected parameters of the terrestrial thermal field within
the Polish Carpathians and the Carpathian Foredeep”

Recenzowana praca doktorska została przygotowana na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Góreckiego. Została ona w całości napisana po angielsku, liczy 101 stron numerowanych oraz 32 mapy znajdujące się na stronach nienumerowanych. Składa się z 6 rozdziałów ((1) **Introduction**, (2) **Characteristics of the dataset**, (3) **Construction of 3D model**, (4) **Model description**, (5) **Thermal model versus geology**, (6) **Conclusions**). oraz pozostającego poza numeracją spisu literatury. Praca jest bogato ilustrowana, tak rozważania teoretyczno-metodyczne jak i wyniki swoich badań Doktorant zilustrował licznymi figurami, co znacznie ułatwia lekturę doktoratu i zrozumienie jego głównych tez. Szczególną wagę mają różnego rodzaju mapy ilustrujące opracowany model rozkładu temperatur górotworu na obszarze badań oraz jego relacje do wybranych elementów budowy geologicznej. Poziom techniczny przygotowania figur jest generalnie wysoki, jedynie w kilku przypadkach brakuje skal barwnych ilustrujących rodzaj i zakres przedstawionych parametrów bądź też skal metrycznych.

Praca doktorska P. mgr Kudrewicza bez wątplenia może – a wręcz powinna - stanowić dobry punkt wyjścia do przygotowania 2 – 3 artykułów skierowanych do krajowych i zagranicznych periodyków geologicznych bądź geofizycznych.

W pierwszym obszernym rozdziale (**Introduction**) Doktorant opisał szereg zagadnień, począwszy od nakreślenia zasadniczego celu prac (1.1 *Scopes of work*), poprzez charakterystykę budowy geologicznej obszaru badań (1.2 *Geological settings*), historię badań w zakresie analiz pola cieplnego (1.3 *History of investigation*), ogólną charakterystyką pola cieplnego Ziemi (1.4 *Earth's thermal field – short characteristics*), problematykę stanu równowagi termicznej w otworach wiertniczych (1.5 *Thermal equilibrium of the well*), rodzaje pomiarów wykonywanych na potrzeby rozpoznania pola cieplnego Ziemi (1.6 *The measurements provided in order to recognize the Earth's thermal field*) oraz kwestię poprawek dla pomiarów na dnie otworu (1.7 *Bottom-Hole Temperature corrections*). Już sama lista tytułów tych podrozdziałów prowadzi do jednego wniosku – że niepotrzebnie zostały one zgromadzone w jednym rozdziale bardzo ogólnie zatytułowanym Wstęp – tego typu rozdział powinien zawierać tylko ogólne omówienie wykonanych badań, kilka słów o obszarze badań i o uzyskanych wynikach. W wersji zastosowanej przez Doktoranta rozrósł się on do obszernego fragmentu doktoratu, w którym znalazło się bardzo wiele zagadnień znacznie wykraczających poza Wstęp jako taki. Oczywiście nie ma to zasadniczego znaczenia merytorycznego, jednak podzielenie tego rozdziału na kilka autonomicznych rozdziałów spowodowałoby, iż zawartość tej części doktoratu byłaby klarowniej zaprezentowana i pewnie nieco łatwiejsza do przyswojenia.

W podrozdziale 1.1. *Scope of work* Autor po raz pierwszy – ale nie ostatni – używa terminu litosfera określając zakres wykonanych przez siebie analiz i modelowań (*This paper presents results of 3D modeling of lithosphere temperature distribution within the Polish Carpathians and Carpathian Foredeep.*). To określenie jest bez wątpienia błędne – wykonane modelowania dotyczyły, jak to Autor sam jednoznacznie określił, strefy od

powierzchni Ziemi po izotermę 160°C co przekłada się na głębokość nie większą niż 7251 m (wg. wyników Autora). Tego typu zasięg głębokościowy nijak się nie ma do miąższości litosfery ziemskiej na obszarze karpackim, szczególnie w jego wschodnim fragmencie, którego podłoże stanowi płyta kontynentalna kratonu wschodnioeuropejskiego. Warto o tym pamiętać podczas przygotowywania tej pracy do druku. W podrozdziale 1.1. *Scope of work* Doktorant zdefiniował również zakres wykonanych prac, jasno stwierdzając, iż jego zasadniczym celem było opracowanie przestrzennego modelu rozkładu temperatury, gradientu termicznego oraz stopnia geotermicznego z głębokością i jego przeanalizowanie w kontekście obserwowanej zmienności poziomej i pionowej tych trzech parametrów. Jak cel dodatkowy Autor wskazał taką graficzną prezentację uzyskanych wyników by było w przyszłości możliwe wykorzystanie uzyskanych wyników do bardziej zaawansowanych analiz geologicznych. Taki podział ma w rzeczy samej odzwierciedlenie w zawartości całej pracy – jej rozdział 5 (*Thermal model versus geology*) zawiera analizę różnego rodzaju elementów budowy geologicznej obszaru badań w kontekście opracowanego modelu termicznego, jednak trudno to uznać za skończoną całość, wyczerpującą te zagadnienia, są to mniej lub bardziej wstępne wnioski i tezy, mogące stanowić punkt wyjścia do dalszych multidyscyplinarnych badań i analiz geofizyczno-geologicznych. Taka jednak była intencja Autora, co zostało jasno zaprezentowane we wstępnej części doktoratu. Podrozdział 1.2. *Geological settings* zawiera krótki opis obszaru badań – i określenie „krótki” to jest raczej eufemizm, gdyż jest to zaledwie 5 zdań opisujących lokalizację obszaru badań, *de facto* bez żadnych informacji na temat jego budowy geologicznej. Autor wyszedł jak sądzę z założenia, że „koń jaki jest każdy widzi” czyli że obszar karpacki, badany od ponad 150 lat, jest tak szeroko znany w środowisku geologicznym, że nie ma potrzeby opisywania jego budowy geologicznej. W przypadku czytelników doktoratu z Polski tego typu założenie jest być może do pewnego stopnia słuszne, jednak generalnie rzecz biorąc syntetyczna informacja na temat budowy Karpat zewnętrznych, zapadliska przedkarpackiego oraz ich podłoża wraz z odniesieniami do kluczowych publikacji na ten temat powinna się być w tym rozdziale znaleźć – w obecnej jego wersji jego tytuł jest uzasadniony tylko w zakresie części *setting*, a na pewno nie w zakresie *geological*. Takie uzupełnienie będzie bez wątpienia niezbędne na potrzeby publikacji, bez względu na to czy miałyby to być artykuł do polskiego czy zagranicznego periodyka. Odmienne zostało potraktowane omówienie historii badań dotyczących pola cieplnego Ziemi – ta część jest opisana bardzo szczegółowo, z odniesieniami literaturowymi sięgającymi XVI wieku. Podobnie potraktowane zostały kolejne wstępne podrozdziały stanowiące podstawę do głównej części doktoratu: stosunkowo szczegółowo omówione zostały pola cieplne Ziemi, problem stanu równowagi termicznej w otworach wiertniczych, rodzaje pomiarów wykonywanych na potrzeby rozpoznania pola cieplnego Ziemi oraz kwestia stosowanych poprawek pomiarów temperatury. Reasumując, rozdział 1, znacznie wykraczający swoją zawartością poza zwykły wstęp, stanowi - poza podrozdziałem 1.2 - dobre wprowadzenie do głównej części doktoratu.

Rozdział 2 ***Characteristics of the dataset*** to bardzo szczegółowe omówienie danych wykorzystanych do przeprowadzonych modelowań. Autor przeanalizował tu kwestię dostępności danych wskazując na różne archiwa, w których one się mogą znajdować, omówił różne formaty danych archiwalnych, procedury pozyskania danych (chodzi tu nie o pomiary a o pozyskanie danych z różnych archiwów) oraz jakość danych. Przedyskutowana została również kluczowa dla danych termicznych kwestia pomiarów wykonywanych w stanie równowagi termicznej otworu bądź też przed osiągnięciem przez otwór takiego stanu. Warto w tym miejscu podkreślić, że Doktorant wykonał ogromną, iście tytaniczną pracę polegającą na zebraniu i opracowaniu pomiarów termicznych z kilkuset otworów odwierconych w trakcie kilku dekad i w konsekwencji pomierzonych za pomocą bardzo różnych aparatów, przechowywanych w różnych formatach, o bardzo różnej jakości etc. Dane te będą mogły być wykorzystywane przez wiele nadchodzących lat do konstrukcji nowych modeli i do kolejnych analiz.

Rozdział 3 **Construction of 3D** model zawiera jedną z dwóch zasadniczych, najważniejszych części doktoratu czyli opis procedury konstrukcji przestrzennego modelu pola cieplnego. Składa się on z trzech zasadniczych części: opisu wykorzystanych danych wejściowych, metod numerycznych użytych do konstrukcji (obliczenia) modelu 3D pola cieplnego oraz oceny jakości uzyskanych wyników. Wszystkie te części – kluczowe dla zrozumienia szczegółów uzyskanych wyników i ich jakości / rozdzielczości – zostały opisane bardzo szczegółowo, z uwzględnieniem takich elementów jak przygotowanie (*preprocessing*) danych pomiarowych do modelowania czyli procedury technicznej edycji danych (łączenie odcinków pomiarowych, usuwanie błędnych pomiarów etc.) czy standaryzacja pomiarów. Same procedury modelowania czyli konstrukcja modelu przestrzennego opisane są w porozdziale 3.2 (*Modelling process*). Modelowanie zrealizowane zostało za pomocą programu Petrel firmy Schlumberger. Autor skonstruował zestaw map obrazujących geometrię izoterm od 10°C do 160°C z krokiem 10°C w oparciu o przygotowane przez siebie dane otworowe oraz o opublikowane atlasy geotermalne. W rozdziale tym brakuje moim zdaniem jednego elementu – dyskusji na temat wpływu bardzo zróżnicowanej budowy geologicznej (litologia, generalny styl strukturalny) trzech podstawowych jednostek geologicznych znajdujących się w obszarze objętym przez model czyli orogenu karpackiego (utwory od kredy po paleogen / miocen charakteryzujące się bardzo skomplikowaną budową fałdowo-nasuwczą), zapadlisko przedkarpackie (utwory mioceńskie o stosunkowo prostej budowie typu *layer cake*) oraz ich podłoże (utwory od prekambriu po kredę o bardzo różnym stopniu zaangażowania tektonicznego) na przestrzenny rozkład pola cieplnego. Struktury fałdowo-nasuwcze w obrębie orogenu karpackiego bez wątpienia muszą mieć jakiś – pewnie niebagatelny – wpływ na rozkład pola cieplnego, co jest pochodną skomplikowanych struktur tektonicznych angażujących skały o zróżnicowanej przewodności cieplnej, w związku z czym ciekawa byłaby dyskusja na temat wpływu tych struktur na opracowany model bądź też na temat możliwych alternatywnych podejść do konstrukcji modelu pola cieplnego wychodzących poza prostą interpolację danych między otworami. Podobny problem można było rozważyć w odniesieniu do podłoża Karpat i zapadliska. Innymi słowy chodziło o analizę podejścia zastosowanego przez Autora czyli procedury *layering* w kontekście stylu strukturalnego obszaru badań i jego wpływu na anizotropię, wspomnianą zresztą przez Autora w tekście doktoratu. Brak jest również dyskusji na temat warunków brzegowych modelu tj. jego jakości i wiarygodności w strefie przygranicznej, gdzie mógł się zaznaczyć wpływ braku danych spoza obszaru Polski.

Skonstruowany przestrzenny model rozkładu temperatury, gradientu termicznego oraz stopnia geotermicznego omówiony został w rozdziale 4 (**Model description**). Opisując model rozkładu temperatury Autor zauważa (str. 63), że jest on dość monotony / jednostajny (*it seems to be a rather parallel and monotonous structure*). Właśnie w tym kontekście przydałaby się wspomniana powyżej dyskusja na temat uwzględnienia budowy strukturalnej orogenu karpackiego w konstrukcji modelu. Każdy model przestrzenny może być analizowany na dowolnie konstruowanych mapach oraz przekrojach, co też zrobił Doktorant, opisując wyniki swoich rozważań w rozdziałach 4.1 (*Maps*) i 4.2 (*Cross-sections*). W oparciu o uzyskane wyniki zidentyfikował on szereg anomalii pola cieplnego, z których część nie była pokazana wcześniej publikowanych mapach.

Jak już wcześniej wspomniano, rozdział 5, zatytułowany *Thermal model versus geology*, zawiera rozważania na temat relacji pola cieplnego do budowy geologicznej obszaru badań. Zgodnie z intencją Autora ta część może być traktowana jako swego rodzaju „otwarcie drzwi” do świata szczegółowych analiz poświęconych relacjom pola cieplnego i budowy geologicznej. W doktoracie omówione zostały kwestie uzyskanych wyników w kontekście wcześniejszych map pola cieplnego z podkreśleniem zauważonych różnic i ich potencjalnych przyczyn. Omówiono również potencjalny wpływ zmienności litologicznej i porowatości górotworu oraz tektoniki na rozkład pola cieplnego, czy wreszcie relacje rozkładu ziół węglowodorów do modelu pola cieplnego. Tak jak to stwierdził sam Autor,

wszystkie te zagadnienia mogą być – i mam nadzieję, że będą – szczegółowej analizowane w przyszłości, w oparciu o skonstruowany model i szczegółowsze analizy geologiczne.

Wnioski natury metodycznej – bardzo ważne w kontekście dostępnych w Polsce pomiarów termicznych – oraz uzyskane wyniki zostały podsumowane w rozdziale 6.

Reasumując, można stwierdzić, iż recenzowany doktorat to dojrzałe studium geofizyczno-geologiczne oparte na analizie danych otworowych, stanowiące bez wątpienia samodzielny dorobek Doktoranta i dokumentujące jego wiedzę dotyczącą różnych aspektów przetwarzania i interpretacji otworowych pomiarów termicznych oraz szerokiego spektrum technik konstrukcji przestrzennych modeli parametrycznych. Doktorant wykazał, iż jest w pełni przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi interpretacyjnych. Biorąc to pod uwagę z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że praca Pana mgr Rafała Kudrewicza zatytułowana „*Spatial distribution of the selected parameters of the terrestrial thermal field within the Polish Carpathians and the Carpathian Foredeep*” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stosownej Ustawie o stopniach i tytule naukowym, i w związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej WGGiOŚ AGH o dopuszczenie Doktoranta do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.

