

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

Warszawa, 10/09/2021

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Stanisława Baudzisa zatytułowanej
„Udoskonalona metodyka interpretacji otworowych profilowań oporności
obciążonych efektem Groningen”**

1. WSTĘP

Recenzowana praca doktorska została opracowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jadwigi Jarzyny z Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. Promotorem pomocniczym był dr Paweł Pomianowski z Geofizyki Toruń S.A. Powstała ona w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” na podstawie umowy o współpracy w zakresie prowadzenia doktoratu wdrożeniowego, zawartej pomiędzy Doktorantem a Geofizyką Toruń S.A. oraz Wydziałem Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Praca doktorska mgr inż. Stanisława Baudzisa liczy 163 strony i składa się z 10 rozdziałów: (1) Wstęp, (2) Stan wiedzy w zakresie otworowych profilowań oporności różnego rodzaju sondami, ze szczególnym uwzględnieniem laterologów dalekiego zasięgu, (3) Zarys budowy geologicznej i warunki występowania złóż węglowodorów na obszarze Niżu Polskiego, (4) Przetwarzanie i interpretacja profilowań oporności wykonanych na polskich złożach laterologami różnego zasięgu z wykorzystaniem dostępnego w Geofizyce Toruń S. A. specjalistycznego oprogramowania, (5) Efektywna metodyka pomiarowo-interpretacyjna dotycząca otworowych profilowań oporności laterologami o dalekim zasięgu, (6) Podsumowanie i wnioski, (7) Literatura, (8) Strony internetowe, (9) Spis figur, i (10) Spis tabel. Rozdziały 1 – 5 składają się z szeregu podrozdziałów, które omówione są poniżej.

Doktorant zajął się w swojej pracy metodycznymi problemami geofizyki otworowej ilustrując je przykładem zastosowania proponowanych przez siebie metod pomiarowo-interpretacyjnych do prac poszukiwawczych prowadzonych na obszarze Niżu Polskiego.

Recenzowana praca doktorska jest bogato ilustrowana, poziom techniczny przygotowania figur jest wysoki a tekst napisany przejrzystie i zarazem bez zbędnych „ozdobników”. Wszystko to bardzo ułatwia jej lekturę i zrozumienie wszystkich głównych tez.

2. OMÓWIENIE I ANALIZA TREŚCI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Celem rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Baudzisa było opracowanie metodyki pomiarowo-interpretacyjnej profilowań oporności obciążonych tzw. efektem Groningen czyli efektem ekranowania występującym w przypadku pomiarów

wykonywanych z użyciem sond typu Dual Laterolog. Jest to istotny problem, notowany w przypadku m.in. głównych poziomów zbiornikowych w obrębie basenu polskiego tj. piaskowców czerwonego spągowca, wapienia podstawowego i dolomitu głównego. Poszukiwanie nowego rozwiązania tego problemu spowodowane było koniecznością znalezienia alternatywy dla kupna bardzo kosztownych sond typu Array Laterolog. W trakcie zrealizowanych prac badawczych Doktorant wykorzystał techniki modelowań matematycznych odpowiedzi elektrycznych sond sterowanych w różnych warunkach geologicznych oraz metody statystyczne z wykorzystaniem wielowymiarowych analiz skupień i sztucznych sieci neuronowych. Jako główny „poligon badawczy” wykorzystane zostało największe polskie złożo ropno-gazowe Barnówko-Mostno-Buszewo. Dodatkowo opracowane zostały również dane z innych części Niżu Polskiego oraz dane z zapadliska przedkarpackiego. Uzyskane wyniki poddano analizie porównawczej ze standardowymi wynikami uzyskanymi dostępnymi komercyjnymi metodami pomiarowymi. Opracowana metoda niwelująca efekt Groningen może być również stosowana do danych archiwalnych, co może znacząco wpłynąć na stronę finansową prowadzonych nadal poszukiwań złóż węglowodorów prowadząc do optymalizacji liczby i lokalizacji nowych otworów poszukiwawczych.

W pierwszym rozdziale (**Wstęp**) Doktorant omówił ciąg zdarzeń, który doprowadził go do podjęcia prac badawczych, które znalazły swój finał w pracy doktorskiej. Początek tych działań związany był z faktem dezaktualizacji rozwiązań stosowanych w Geofizyce Toruń S.A. w zakresie metodyki pomiarów i interpretacji danych pozyskiwanych za pomocą kupionej w początkach lat 1990' sondy Dual Laterolog. Prace badawcze dotyczące tego problemu realizowane były w ramach współpracy Geofizyki Toruń S.A. i Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH, w ramach projektu „Modelowanie odpowiedzi sterowanych sond do profilowania oporności w zróżnicowanych ośrodkach geologicznych dla poprawnego wyznaczenia oporności rzeczywistej warstw”. Wyniki tego projektu stanowiły punkt startowy i zarazem punkt odniesienia dla wyników zaprezentowanych w recenzowanej pracy doktorskiej. W rozdziale 1 omówiony został pokrótce efekt ekranowania zwany efektem Groningen, który powoduje sztuczne zawyżanie rejestrowanej oporności pozornej sondą dalekiego zasięgu. Zjawisko to, obserwowane dla głównych poziomów zbiornikowych na Niżu Polskim tj. dla utworów czerwonego spągowca (P1), dolomitu głównego (Ca2) oraz wapienia cechsztyńskiego (Ca1), związane jest z efektem pozornego nasycenia węglowodorami w stropowej części poziomu zbiornikowego co rzecz jasna w negatywny sposób może rzutować na wyniki interpretacji złożowych.

Po krótkim omówieniu pomiarów oporności w otworach wiertniczych, wykonywanych od 1927 r. i ich wykorzystania do oceny porowatości ośrodka skalnego i jego nasycenia węglowodorami Doktorant opisał w podrozdziale 1.1 (*Współczesne zastosowania laterologów*) podstawowy zakres wykorzystania pomiarów sondą Dual Laterolog a w podrozdziale 1.2 zatytułowanym *Reinterpretacja materiałów archiwalnych* wybrane aspekty analiz opornościowych danych karotażowych pozyskanych w minionych dekadach przez Geofizykę Toruń S.A. Część wstępna doktoratu została zakończona tezą, iż *„Zestaw sond do profilowania oporności, odpowiednio dobranych do warunków geologicznych i dopasowana metodyka pomiarów w otworach oraz system poprawek, dobranych do rodzaju profilowania oporności, gwarantują wyznaczenie oporności rzeczywistej na podstawie pomierzonej oporności pozornej, a w konsekwencji wiarygodna rzeczywista wartość oporności prowadzi do poprawnego wyznaczenia nasycenia*

wodą/węglowodoram”. Teza stanowi zgrabne motto dla całej dalszej części doktoratu.

Rozdział 2 (**Stan wiedzy w zakresie otworowych profilowań oporności różnego rodzaju sondami, ze szczególnym uwzględnieniem laterologów dalekiego zasięgu**), to dość obszerne, trzydziestostronicowe, szczegółowe i bogato ilustrowane omówienie przeróżnych aspektów otworowych pomiarów opornościowych. Z lektury tej części doktoratu można się dużo dowiedzieć na temat historii wprowadzania w Polsce do praktyki poszukiwawczej pomiarów opornościowych, stosowanych sond oraz metod interpretacji wyników (podrozdziały 2.1 i 2.2). W podrozdziałach 2.3 (*Laterolog jako sonda stanowiąca udoskonalenie wczesnych urządzeń do profilowań oporności*) i 2.4 (*Modyfikacje laterologów*) omówiono sondy, które kierują skupioną wiązkę linii sił pola elektrycznego prostopadle od sondy do mierzonej formacji czyli tzw. laterologi - czyli sondy, które były głównym obiektem zainteresowania Doktoranta. W podrozdziale 2.4 zatytułowanym *Efekt Groningen* omówił on z kolei efekt ekranujący miększej warstwy wysokooporowej znajdującej się ponad warstwą zbiornikową, istotnie wpływający na dane pomiarowe pozyskiwane za pomocą laterologów, w szczególności za pomocą sondy Dual Laterolog wykorzystywanej w Geofizyce Toruń S.A. Ostatni podrozdział (*Najnowsze rozwiązania w zakresie sond sterowanych do profilowania oporności*) to syntetyczne omówienie obecnego *status quo* w zakresie pomiarów oporności. Warto podkreślić, że całość tych opisów „historyczno – metodycznych” jest bardzo klarowna, przystępnie napisana i szczegółowo zilustrowana. Rozdział 2 podsumowany został bardzo istotnym stwierdzeniem, iż „*mimo wielkich wysiłków konstruktorów nie udało się pozbyć efektu Groningen na krzywych profilowań oporności rejestrowanych sondami o dalekim radialnym zasięgu*”.

W rozdziale 3 zatytułowanym **Zarys budowy geologicznej i warunki występowania złóż węglowodorów na obszarze Niżu Polskiego** Doktorant syntetycznie opisał budowę geologiczną obszaru, z którego pochodziły opracowywane przez niego dane karotażowe. Wspomniał o występowaniu trzech zasadniczych pięter strukturalnych – waryscyjskiego, permsko-mezozoicznego i kenozoicznego – jednak sam opis został ograniczony do nadzwyczaj krótkiej wzmianki na temat piętra waryscyjskiego oraz opisu utworów permskich czerwonego spągowca i cechsztynu. Jest to o tyle zrozumiałe, że w utworach tych występują wszystkie złoża węglowodorów ale trochę szkoda, że utwory mezozoiku i kenozoiku nie zostały również przynajmniej pobieżnie omówione. Szkoda też, że Doktorant nie odniósł stosowanych przez siebie „klasycznych” wydzieleni litostratygraficznych do obecnie obowiązujących wydzieleni stratygraficznych permu. Dla meritum pracy doktorskiej nie ma to rzecz jasna żadnego znaczenia ale tego typu objaśnienia – choćby w postaci jednej syntetycznej tabeli stratygraficznej, którą bez problemu można znaleźć w literaturze przedmiotu – pozwoliłoby na umieszczenie obiektów badawczych w stosownym regionalnym kontekście geologicznym. Rozdział 3 zakończony został omówieniem potencjału złożowego utworów permu.

Dwa kolejne rozdziały, 4 zatytułowany **Przetwarzanie i interpretacja profilowań oporności wykonanych na polskich złożach laterologami różnego zasięgu z wykorzystaniem dostępnego w Geofizyce Toruń S. A. specjalistycznego oprogramowania** i 5 zatytułowany **Efektowna metodyka pomiarowo-interpretacyjna dotycząca otworowych profilowań oporności**

laterologami o dalekim zasięgu, stanowią zasadniczą część recenzowanej pracy doktorskiej.

W rozdziale 4 Doktorant bardzo szczegółowo omówił różne aspekty przetwarzania i interpretacji danych pozyskanych przez Geofizykę Toruń S.A. za pomocą laterologów o różnych zasięgach. Jak to powyżej już wspomniano, „poligonem badawczym” był obszar złoża Barnówko-Mostno-Buszewo, odkrytego w 1993 roku. Rejon ten został bardzo gęsto rozwiercony, dzięki czemu dostępna tam jest pokaźna baza danych pomiarowych. Na potrzeby recenzowanego doktoratu opracowano dane z 42 otworów, odwierconych w latach 1994 - 2015. Reinterpretacja nasycenia horyzontów złożowych wykonana została samodzielnie przez Doktoranta. Podrozdział 4.1 zatytułowany *Analiza profilowań oporności i innych danych geofizyki otworowej w wybranych otworach (42 otwory na złożu Barnówko-Mostno-Buszewo, BMB)* zawiera syntetyczne omówienie historii rozpoznania karotażowego złoża Barnówko-Mostno-Buszewo ze szczególnym uwzględnieniem poziomu dolomitu głównego (Ca²). Doktorant omówił w nim szereg przykładów pomiarów oporności, ilustrujących występowanie efektu Groningen bądź jego brak. Problemowi temu poświęcone zostały dwa kolejne podrozdziały, zawierające szczegółowe omówienie przykładów poprawnie (podrozdział 4.2) i niepoprawnie (podrozdział 4.3) wyznaczonego nasycenia na podstawie pomiarów sondą Dual Laterolog czyli innymi słowy ilustrujące wpływ efektu Groningen. W obu przypadkach wyniki analiz przedstawiono dla dwóch typów sond: standardowej sondy Dual Laterolog oraz dla laterologu dalekiego zasięgu z odwróconą elektrodą. Wyniki interpretacji danych karotażowych zostały skonfrontowane z wynikami badań próbnikiem i testami złożowymi, ilustrującymi rzeczywisty potencjał złożowy badanego interwału. Ilustracja różnych aspektów efektu Groningen nie została ograniczona do dolomitu głównego – w podrozdziale 4.4 zatytułowanym *Analiza porównawcza wyników interpretacji profilowań oporności w złożach zróżnicowanych pod względem budowy geologicznej* Doktorant na podstawie 10 otworów omówił i zilustrował ten problem dla utworów klastycznych czerwonego spągowca. W analizie tej uwzględnione zostały tak konwencjonalne złoża gazu ziemnego jak i złoża niekonwencjonalne typu *tight gas*.

W rozdziale 5 zatytułowanym **Efektywna metodyka pomiarowo-interpretacyjna dotycząca otworowych profilowań oporności laterologami o dalekim zasięgu** przeanalizowano kryteria wyboru optymalnego zestawu sond do wyznaczenia rzeczywistej oporności w strefie poza obszarem filtracji i nasycenia wodą bądź węglowodorami (podrozdział 5.1), w podrozdziałach 5.2 - 5.4 omówiono program Poprawki_LLD_LLS_2021, służący do wyznaczania oporności rzeczywistej ośrodków skalnych przy pomiarach sterowanymi sondami typu Dual Laterolog w sytuacji występowania efektu ekranowania, a w podrozdziale 5.5 Doktorant omówił zastosowanie sieci neuronowych do wyznaczenia rzeczywistej oporności strefy niezmięnionej w przypadku występowania efektu Groningen.

Program Poprawki_LLD_LLS_2021 został opracowany przez Doktoranta w oparciu o program Poprawki, będący efektem projektu badawczego „Modelowanie odpowiedzi sterowanych sond do profilowania oporności w zróżnicowanych ośrodkach geologicznych dla poprawienia wyznaczania oporności rzeczywistej warstw” zrealizowanego przez zespół z Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH przy współpracy PGNiG S.A. oraz GT S.A., którego Doktorant był aktywnym uczestnikiem. W rozdziale 5.2 opisano opracowany w ramach projektu algorytm do obliczania

potencjału pola elektrycznego wzbudzanego elektrodą punktową w cylindrycznym otworze o zadanym promieniu i zadanej oporności właściwej, omówiono również prace modelowe, które pozwoliły na utworzenie bazy krzywych teoretycznych do obliczania poprawek na wpływ otworu, wpływ skończonej miąższości warstwy, oporności środowiska pomiarowego oraz wpływu strefy filtracji. W drugiej części podrozdziału 5.2 opisane zostały wprowadzone przez Doktoranta do programu Poprawka zmiany mające na celu udoskonalenie jego funkcjonalności. Podrozdział 5.3, zatytułowany *Testowanie programu Poprawki_LLD_LLS_2021 w zastosowaniu do wyników dostarczonych przez standardowe laterologi w zróżnicowanych profilach litologicznych* zawiera szczegółowy opis testów programu Poprawki_LLD_LLS_2021, które wykonał Doktorant używając do tego wyników pomiarowych pozyskanych przez Geofizykę Toruń S.A. Analogiczne testy dla wyników uzyskanych za pomocą sondy typu High Resolution Array Laterolog zostały opisane w podrozdziale 5.4. Przeprowadzone testy pokazały, iż program Poprawki_LLD_LLS_2021 pozwala na skuteczne zniwelowanie efektu Groningen. W ostatnim podrozdziale 5.5. zatytułowanym *Zastosowanie sieci neuronowych do wyznaczenia rzeczywistej oporności strefy niezmięnionej w przypadku występowania efektu Groningen* omówione zostały efekty poszukiwań optymalnych metod pomiarowych i analitycznych do określania prawidłowej wartości oporności strefy nienaruszonej R_t , wśród których był również metody oparte o wykorzystanie sieci neuronowych. W tym wypadku Doktorant rozszerzył zakres opracowanych danych o dane karotażowe z zapadliska przedkarpackiego. W efekcie wykonanych analiz stwierdził on, że wykorzystanie sieci neuronowych przy wyznaczaniu oporności strefy nienaruszonej R_t może być dodatkowym, pomocnym narzędziem wykorzystywanym w procesie interpretacji, jednak metoda ta może być podstawą wyznaczania wartości oporności rzeczywistej tylko w sytuacji dostępu do dużej ilości wiarygodnych informacji geologiczno-złożowych, mogących służyć jako zestaw „uczący”. Oznacza to, że wykorzystanie sieci neuronowych może mieć miejsce w przypadku rozwiercania już zidentyfikowanych obiektów złożowych natomiast na etapie poszukiwań wykorzystanie tych technik analiz danych byłoby mało efektywne.

3. WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując, można stwierdzić, iż recenzowany doktorat to nowatorskie studium geofizyczne oparte na dużej liczbie danych karotażowych samodzielnie przeanalizowanych przez Doktoranta, dokumentujące jego wiedzę dotyczącą interpretacji danych geofizyki otworowej oraz zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Biorąc to pod uwagę mogę stwierdzić, że praca Pana mgr inż. Stanisława Baudzisa zatytułowana „*Udoskonalona metodyka interpretacji otworowych profilowań oporności obciążonych efektem Groningen*” spełnia 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.

