

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Zaręby pt.**

**„Badanie możliwości wykorzystania pionowych profilowań sejsmicznych typu kroczącego do uszczegóławiania informacji na temat własności sprężystych ośrodka”**

**1. Podstawy formalne wykonanej recenzji**

Niniejsza recenzja wykonana została na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Nauki o Ziemi i Środowisku AGH, Pana prof. dr. hab. inż. Jacka Matyszkiewicza z dn. 27 kwietnia 2021 r., zawiadamiającego o powołaniu mnie przez Radę Dyscypliny na recenzenta przedmiotowej rozprawy.

**2. Uwagi ogólne**

Rozprawa napisana została w języku polskim. Zasadnicza część pracy składa się z 5 rozdziałów, wstępu oraz podsumowania. Praca łącznie liczy 131 stron, zawiera 119 pozycji bibliograficznych oraz 71 rysunków. Rozprawa nie zawiera streszczeń zarówno w języku polskim, jak i w j. angielskim. Zostały one dołączone osobno – tylko w wersji elektronicznej.

Wstęp zawiera krótkie wprowadzenie w tematykę badań sejsmicznych (w tym PPS) oraz badań anizotropii, zdefiniowane są w nim cele pracy, jak również przedstawiony jest schemat rozprawy. W rozdz. 2 omówiono historię badań typu PPS, ich zastosowanie, rodzaje akwizycji oraz przetwarzanie. Rozdz. 3 dotyczy anizotropii własności sprężystych ośrodka skalnego. Opisana została w nim historia badań anizotropii sejsmicznej oraz teoretyczne podstawy najczęściej stosowanych modeli anizotropii (VTI, HTI, symetria ortorombiczna), jak również przyczyny powstawania zjawiska anizotropii własności sprężystych ośrodka. Rozdz. 4 traktuje o budowie geologicznej rejonu badań. Zawarto w nim także informacje o wynikach wcześniejszych prac sejsmicznych oraz opisano parametry akwizycji danych typu PPS w otworze Wysin-1. Rozdz. 5 dotyczy przetwarzania danych PPS kroczącego Wysin-1. Omówiono w nim procedury tłumienia zakłóceń, rozdział pól falowych, sekwencję przetwarzania dla celów inwersji fali podłużnej oraz poprawkę na wpływ zmiany strefy przypowierzchniowej. Rozdz. 6 dotyczy wyznaczania lokalnej anizotropii własności sprężystych w otworze Wysin-1. Przedstawiono w nim teoretyczne podstawy metody wyznaczania lokalnej anizotropii bazującej na spowolnieniu i polaryzacji fal P, a następnie omówiono wyniki zastosowania tej metody do danych PPS z otworu Wysin-1. Finalnie porównano wyniki inwersji z dostępnymi danymi geofizyki wiertniczej. Pracę kończy rozdział „Podsumowania, wnioski i rekomendacje”, w którym omówiono osiągnięcia rozprawy, jak również sformułowane zostały w nim wnioski dotyczące prowadzenia przyszłych prac typu PPS.

### 3. Uwagi merytoryczne

#### Struktura pracy i aspekty edycyjne

Wszystkie wyniki przedstawione w rozprawie zostały wcześniej opublikowane przez Autora w następujących publikacjach:

**Zaręba, M., & Danek, T. (2018).** VSP polarization angles determination: Wysin-1 processing case study. *Acta Geophysica*, 66(5), 1047-1062.

**Zaręba, M., Danek, T., & Stefaniuk, M. (2019).** Some statistical consideration of azimuth and inclination angles determination based on walk-away VSP data in Python. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 133, p. 01006). EDP Sciences.

**Zaręba, M., Danek, T., & Stefaniuk, M. (2021).** P-Wave-Only Inversion of Challenging Walkaway VSP Data for Detailed Estimation of Local Anisotropy and Reservoir Parameters: A Case Study of Seismic Processing in Northern Poland. *Energies*, 14(8), 2061.

Może dziwić fakt, że praca ma formę monografii, a nie opiera się o ww. publikacje. Z drugiej strony, jakość czasopism (zarówno *Acta Geophysica* jak i *Energies*), nie jest najwyższa. W tym kontekście docenić należy, że praca została napisana w języku polskim. Niestety, w wielu miejscach przebija się żargon techniczny typowy dla raportów i sprawozdań. Jego przykład mamy na s. 22, gdzie mowa jest o „głębokości zalegania reflektora”. W kilku miejscach pojawiają się kalki językowe, np. stres zamiast naprężenia na s. 27. W pracy pojawia się błędny termin „opóźnienie” jako ekwiwalent angielskiego terminu *slowness* (odwrotność prędkości). W tym samym rozdziale 6.1 pojawia się jednak prawidłowa forma, czyli „spowolnienie”.

Duże zastrzeżenia budzi strona graficzna pracy – jakość rysunków jest dużo lepsza w ww. publikacjach Autora niż w samej rozprawie. Większość rysunków ma źle dobrane wielkość czcionki, grubość linii, etc. Część z nich powiększona jest na całą stronę, podczas gdy na stronie zmieściłoby się kilka paneli (łatwiej byłoby porównać różne wykresy). Rysunki przedstawiające dane to najczęściej zrzuty ekranu z środowiska SeisSpace. Spodziewałbym się, że Autor tworząc autorskie oprogramowanie do analizy danych w Pythonie, użyje Pythona także do stworzenia wysokiej jakości rysunków z danymi sejsmicznymi.

W pracy brak jest wykazu skrótów oraz symboli. Powinny one być stosowane jednolicie w całej pracy i tak np. kąt polaryzacji z rozdz. 6.1, powinien być wcześniej zdefiniowany w rozdz. 5.2.

W rozprawie wymieszane są części teoretyczne i te odnoszące się stricte do analizy danych pomiarowych. Dotyczy to rozdziałów 5 i 6. Podrozdział 5.1 (Procedury tłumienia zakłóceń) oraz 5.2 (Rozdział pól falowych) powinny zostać przeniesione do rozdziału 2. Z kolei podrozdział 6.1 (Metoda wyznaczania lokalnej anizotropii przy użyciu badań PPS typu kroczącego) powinien znaleźć się w rozdziale 3 (Anizotropia).

Dobór literatury jest specyficzny – autor pomija kilka znaczących pozycji, dotyczących analiz anizotropii z danych PPS (np. Miller et al. 1994, MacBeth 2002, Asgharzadeh et al. 2013, i wiele innych). W miejscach wymagających zacytowania „klasycznej” literatury, cytowane są nieco losowo wybrane poszerzone streszczenia z konferencji SEG lub polskie pozycje literaturowe.

Rozumiem aspekt edukacyjny i ukierunkowanie czytelnika na polską literaturę przedmiotu, jednak jest to rozprawa doktorska.

### Ocena zawartości merytorycznej

Ocenę zawartości merytorycznej rozprawy zacznę od tytułu rozprawy. Jest on niestety dość niefortunny. „Badanie możliwości wykorzystania...” jest stwierdzeniem zbyt ogólnikowym i nie określa jasno problemu badawczego postawionego przed Doktorantem. Problem ten zostaje zdefiniowany we wstępie, gdzie czytamy, że „Celem niniejszej pracy jest przeanalizowanie możliwości wykorzystania eksperymentalnych badań pionowych profilowań sejsmicznych typu kroczącego, zarejestrowanych w otworze poszukiwawczym Wysin-1, do uzyskania informacji na temat parametrów anizotropii sprężystej ośrodka skalnego wykorzystując analizę czasów opóźnień i polaryzacji fali podłużnej”. Jak widzimy, cel ten, w przeciwieństwie do tytułu, jest sformułowany konkretniej. W dalszej części Autor szczegółowo rozwija aspekty poruszane w rozprawie. Są to:

- (i) optymalna metodyka przetwarzania danych pionowych profilowań sejsmicznych typu kroczącego dla celów poprawnego wyznaczenia kątów polaryzacji, niezbędnych do estymacji parametrów anizotropii sprężystej ośrodka skalnego;
- (ii) wpływ zmian strefy przypowierzchniowej na potrzeby składowania pionowego danych PPS;
- (iii) możliwość zastosowania inwersji fali podłużnej metodą opóźnienie-polaryzacja, w celu odtworzenia własności sprężystych w ośrodku płasko - równoległym z pionową osią symetrii;
- (iv) informacje na temat ośrodka skalnego, które można uzyskać z badań PPS typu kroczącego w kontekście innych metod geofizycznych wykorzystujących pole fal sprężystych.

O ile **punkty (i) i (ii) nie były jak do tej pory szerzej analizowane**, o tyle odpowiedź na kwestie (iii) i (iv) jest oczywista, jeśli odnieść je do danych PPS w ogóle.

Pomijając część wstępną, praca jest dwudzielna. Pierwsza, zasadnicza część, to analiza danych eksperymentalnych PPS, ukierunkowana na wyznaczenie stabilnych kątów polaryzacji oraz „pikowalnych” pierwszych wstępień, tak aby móc użyć te dane do estymacji lokalnej anizotropii ośrodka. Część druga, to wykorzystanie tak przetworzonych danych połowych do inwersji parametrów anizotropowych w ośrodku typu VTI. Pierwsza część była z pewnością bardzo czasochłonna, szczególnie biorąc pod uwagę jakość danych, jednak wnioski z niej płynące wydają się dość intuicyjne (wybór procedury S4 jako optymalnej). Część związana z inwersją parametrów anizotropowych pozostawia pewien niedosyt, bo wykorzystano w niej tylko jeden rodzaj inwersji (metoda *slowness-polarization*). Wyniki inwersji z kolei nie porównano w pełni z dostępnymi danymi otworowymi oraz sejsmicznymi. Zaskakujące są też uzyskane wartości parametrów anizotropii, które są bardzo niskie (w zasadzie bliskie ośrodkowi izotropowemu). Należy w tym miejscu zaznaczyć, że w pracy pojawia się wielokrotnie twierdzenie o „słabej anizotropii” (np. s. 59) w obszarze badań na podstawie wcześniejszych analiz. Rozróżnić tu należy anizotropię azymutalną, która faktycznie jest niewielka (np. Cyz i Malinowski 2018) oraz anizotropię polarną typu VTI, która osiąga wartości rzędu 10-20% dla kompleksu skał dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim. Autor bada przy tym anizotropię typu VTI, a nie anizotropię azymutalną! Wyniki uzyskane przez autora są sprzeczne z ww. wartościami dla ośrodka VTI. Doktorant stwierdza na s. 104, że „Ich (tzn. parametrów z inwersji) wartości są małe i pokrywają się z rzędami wielkości

określonymi na podstawie badań sejsmiki powierzchniowej 3D". **Jakie są zatem wartości parametrów z sejsmiki 3D?**

W tym kontekście, bardzo zasadne wydawać by się mogło przeprowadzenie analiz dla syntetycznych danych PPS, wykorzystując prosty model ośrodka typu VTI z parametrami takimi jak wyznaczonymi np. z sejsmiki powierzchniowej i trasowanie promienia sejsmicznego. Pokazałoby ono m.in. zakres spodziewanych kątów inklinacji i zakres parametrów Thomsena, które można wiarygodnie odtworzyć. Niestety modelowania takiego zabrakło w pracy, choć model ośrodka pojawia się np. w publikacjach autora w *Acta Geophysica* czy w *Energies*.

Do wyznaczenia parametrów lokalnej anizotropii z danych typu PPS stosuje się dwie klasy metod – bazującą jedynie na *slowness* oraz *slowness-polarization*. Autor stosuje w rozprawie podejście *slowness-polarization*. Zaskakujące jest to, że w podrozdziale 6.1 opisana jest jedynie metoda Grechki i Mateevy (2007). Zarówno w rozdziale 2, jak i 3, brak jest wzmianki o innych metodach, w tym całej klasie metod bazujących jedynie na parametrze *slowness* (np. Miller et al. 1994, MacBeth 2002): Na s. 23 autor stwierdza lakonicznie, że „Parametry anizotropii własności sprężystych mogą zostać również określone na podstawie badań PPS. Dzięki specyficznej geometrii pomiarowej, w której odbiorniki znajdują się w otworze wiertniczym na znanej głębokości, możliwe jest określenie parametrów anizotropii z dużą dokładnością w domenie głębokości, wykorzystując metodę opóźnienia-polaryzacji opisaną w rozdziale 6.1”.

Podejście bazujące na samym *slowness* jest dużo prostsze i nie wymaga m.in. określenia kątów polaryzacji/kątów fazowych. **Dlaczego podejście to nie zostało wykorzystane w rozprawie?** Proszę o komentarz Doktoranta, wraz z uzasadnieniem dotyczącym założeń odnośnie stosowalności obu klas metod. Interesujące byłoby porównanie wyników z obu metod, w szczególności z uwzględnieniem konkluzji z pracy Asgharzadeha et al. (2013). Dane syntetyczne mogłyby także posłużyć do przetestowania ww. metod (i przeprowadzenia *sensitivity study*).

Badanie wpływu strefy przypowierzchniowej sprowadzało się do analizy dopasowania sygnałów wzbudzanych w danym punkcie – kolejnych powtórzeń *sweepu*. Z opisu akwizycji nie wynika, jakie były odstępy czasu pomiędzy kolejnymi wzbudzeniami w tym samym punkcie? **Czy analizy dopasowania sygnału można było uniknąć, gdyby dane korelowano z estymatą „ground force” a nie z trasą pilota?**

**Jaki jest wpływ nieuwzględnienia statyki na punkt odbioru (przy tak niejednorodnej SMP jak na Pomorzu) przy analizach anizotropii z danych PPS?**

W pracy zabrakło bardziej przemyślanego sposobu weryfikacji uzyskanych parametrów anizotropowych, w tym np. porównania z parametrami Thomsena uzyskanymi z uśredniania Backusa dla układu cienkich warstw (por. Liner i Fei 2007, kod zaimplementowany w Seismic Unix) czy z profilowaniem gamma (zawartość materiałów ilastych). Razi to, że na wynikowych rysunkach 6.12 i 6.13 nie nałożono litologii, jak również nie nałożono  $V_{p0}$  z PPS na krzywą  $V_p$  z karotażu.

Uwagi szczegółowe

Rozdział 2

Rozdział napisany bardzo ogólnie. Zabrakło w nim informacji o nowych metodach pomiaru, np. DAS, które zrewolucjonizowały pomiary VSP oraz o osobnej klasie badań VSP, czyli *reverse-VSP*.

Poprawki statyczne dla punktu wzbudzenia – są one tak naprawdę krytyczne dla uzyskania prawidłowego obrazowania (nie chodzi tylko o dowiązanie do sejsmiki powierzchniowej), ale także dla innych analiz (w tym anizotropii).

Fala Stoneleya nie Stanleya (s. 16)

Model prędkości dla transformacji VSP-CDP wyznacza się głównie z samych danych VSP

### Rozdział 3

Część historyczna dotycząca badań nad anizotropią jest zbędna, a kuriozalne jest dołączenie portretu M.P. Rudzkiego.

Anizotropowe poprawki statyczne to nie jest standard (s. 22).

Rys. 3.5 jest zbędny.

### Rozdział 4

Rozdział ten jest najgorszym fragmentem całej rozprawy – wygląda w większości jak przekopiowany z raportów, zawiera zbyt wiele szczegółowych informacji, nie wnoszących nic istotnego. Z kolei nie sposób dowiedzieć się z niego jaki był odstęp czasowy pomiędzy wzbudzeniem na kolejnych PW, czy jakie zastosowano wibratory / *peak force*? Dlaczego umieszczono np. kiepskiej jakości rys. 4.3? Dlaczego wykres elewacji PW jest zrzutem z ekranu z SeisSpace?

Analiza anizotropii sejsmicznej (s. 35) – jakiej? Azymutalnej?

Analizy pokazują również, że kierunkiem uprzywilejowanym jest kierunek 30 stopni (s. 35) – jakie analizy?

Jakie jest źródło rys. 4.6?

### Rozdział 5

Edycja tras – ile usunięto tras (%)?

Jak pikowano pierwsze wstąpienia? Ręcznie, automatycznie? Ciekawe byłoby przedstawienie całego zbioru pierwszych wstąpień (np. wraz z offsetem lub  $\text{offset}^2 - t^2$ ).

Jak dobrano długość okna czasowego do analizy polaryzacji?

Rys. 5.2-5.3 Brakuje tu spektrum częstotliwościowego danych. Ciekawe byłoby pokazanie wersji po kolejnych krokach przetwarzania. Jak wyglądają składowe poziome? Jak wyglądają dane dla innych PW?

Brak jest definicji polaryzacji sygnału i powiązania z rysunkami dotyczącymi rotacji składowych.

Czy wszystkie testowane metody rotacji składowych były zaimplementowane w programie SeisSpace?

Rys. 5.9 – 5.11: de facto, po rotacji to nie składowe Z-H1-H2 tylko Z-R-T

W analizie różnych sekwencji, można było jeszcze uwzględnić odsumowanie tras typu raw, przed wykonaniem kroskorelacji ze sweepem. Jest to efektywna metoda w przypadku wystąpienia silnych zakłóceń.

Czy EDA nie tłumaczy się jako eksploracyjna analiza danych? (s. 59-60)

Jak liczone stosunek S/N (s. 61)?

Dlaczego w analizie S/N (5.12-5.13) uwzględniono jedynie offset 3200 m?

Rys. 5.16 – czym jest wzbudzenie środkowe w tym kontekście?

Interesujące byłoby pokazać dane w domenie x-t przed/po zastosowaniu funkcji dopasowania sygnału przed składaniem.

Jakie są kryteria „użyteczności” danych do analiz *slowness-polarization*? (s. 85)

## Rozdział 6

Czy wybrane 39 punktów strzałowych jest rozłożone symetrycznie po obu stronach otworu? Czy Autor analizował symetrię czasów pierwszych wstąpień dla kolekcji wspólnego odbiornika?

Błąd inklinacji równy 5 stopni (s. 94) to b. dużo, szczególnie, że błędy nawet dla dalekich offsetów (3 km) są na poziomie 1 stopnia.

Równanie 6.15 pokazuje błąd wyznaczenia parametrów anizotropii, jednak dalej w pracy **błędy te nie zostały pokazane (w szczególności na wynikowym rys. 6.11).**

Rys. 6.4 – 6.10 wartości spowolnienia (nie opóźnienia!) podano w jednostkach imperialnych (s/kft) a nie w układzie SI. Na rysunkach 6.5 – 6.10 należało także wyrysować błędy wyznaczenia spowolnienia i kąta inklinacji. Rys. 6.5 ma inną skalę – trudniej go porównać z pozostałymi. Jak rozumiem, na rysunkach tych pokazano wyniki dla grupy 7 odbiorników (105 m) dla 39 punktów wzbudzenia. Skąd zatem pojawia się więcej punktów eksperymentalnych? **Jak przedstawiałyby się krzywa dla modelu VTI z parametrami Thomsena jak dla migracji sejsmiki powierzchniowej nałożona na te wykresy?**

Minimalizacja funkcji celu (równ. 6.14) – w jaki sposób?

Nie wykazano korelacji z litologią z rdzenia (s. 107) – litologii brak na rys. 6.11-12.

Ponownie pojawia się kwestia, ile wynosiły parametry Thomsena dla sejsmiki? (s. 107)

#### 4. Podsumowanie

Wracając do postawionych przez Doktoranta we wstępie pytań badawczych (przywołanych w pkt. 3 recenzji), należy stwierdzić, że **przedstawił on oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** poruszonego w pkt (i) i (ii), tj. stworzenie optymalnej metodyki przetwarzania danych PPS typu kroczącego dla celów poprawnego wyznaczenia kątów polaryzacji, niezbędnych do estymacji parametrów anizotropii sprężystej ośrodka skalnego, z uwzględnieniem wpływu zmiany strefy przypowierzchniowej. Problem (iii) czyli możliwość zastosowania inwersji fali podłużnej metodą opóźnienie-polaryzacja, w celu odtworzenia własności sprężystych w ośrodku płasko - równoległym z pionową osią symetrii, potraktowany literalnie, jest trywialny, gdyż rozwiązanie to zostało zaproponowane np. przez Greckę i Mateevę (2007) i wykorzystane w niniejszej rozprawie. Oczywiście, jeśli potraktować problem (iii) wężiej, tzn. odnieść tylko do danych PPS z otworu Wysin-1, to Doktorant pomyślnie zastosował ww. metodykę do odtworzenia lokalnych parametrów modelu VTI. Otrzymane parametry są jednak dość zaskakujące, wskazujące, że ośrodek jest bliski ośrodkowi izotropowemu. Nie znalazłem w pracy odpowiedzi na kwestię (iv) czyli czy badania PPS wnoszą komplementarne informacje na temat ośrodka skalnego w tym konkretnym przypadku? W pracy brakuje swoistej „kropki nad i”, czyli przetworzenia danych PPS do formy końcowej sumy lub zmigrowanej sekcji, z wykorzystaniem modelu VTI wyznaczonego w rozprawie (oczywiście z zastrzeżeniem, że uzyskane parametry wskazują na model bliski izotropowemu) i porównania jej z sejsmiką 3D. Aby w pełni odpowiedzieć na to pytanie należałoby także rozbudować porównanie uzyskanego modelu z danymi otworowymi (np. z parametrami Thomsena z uśredniania Backusa, czy profilowaniem gamma).

Pomimo licznych niedociągnięć, Doktorant wykazał z pewnością biegłość w analizie danych sejsmicznych (należy podkreślić, że dane zostały pomierzone w bardzo trudnych warunkach terenowych!), w tym z wykorzystaniem analiz statystycznych, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu geofizyki, jak również samodzielność w prowadzeniu pracy naukowej.

W związku z powyższym, zgodnie z obowiązującymi przepisami Ustawy i Rozporządzenia, wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Zaręby do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.