

Poczdam, 29 Września 2023

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Eryka Święcha

pt. „Otworowy monitoring mikrosejsmiczny szczelinowania hydraulicznego warstw z niekonwencjonalnymi złożami gazu ziemnego. Optymalizacja metod akwizycji, przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych”

### 1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Eryka Święcha pt. „Otworowy monitoring mikrosejsmiczny szczelinowania hydraulicznego warstw z niekonwencjonalnymi złożami gazu ziemnego. Optymalizacja metod akwizycji, przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych” została opracowana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny – Nauki o Ziemi i Środowisku, prof. dr. hab. inż. Jacka Matyszkiewicza, z 12.06.2023, o sygnaturze RDN-NoZiŚ-dz.510-7/2023. Rozprawa doktorska powstała w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Michała Stefaniuka oraz promotora pomocniczego dr. inż. Tomasza Maćkowskiego.

Recenzowana praca składa się z 132 stron tekstu. Zasadnicza część pracy zawiera 6 rozdziałów z podrozdziałami zawierającym wprowadzenie do rozprawy, charakterystykę obszaru badań, studium modelowe wykonalności otworowego monitoring sejsmicznego, dyskusję akwizycji i oceny jakości zarejestrowanych danych, dyskusję przetwarzania danych, interpretację, podsumowanie i wnioski. Spis literatury zawiera w sumie 88 pozycji (publikacje polskich i zagranicznych autorów). W skład pracy wchodzi 63 rysunków oraz 8 tabel. Rozprawa napisana jest w języku polskim. Tytuł pracy odzwierciedla jej treść.

Celem pracy jest (za streszczeniem) „dostosowanie i zoptymalizowanie technologii akwizycji oraz przetwarzania i interpretacji danych otworowego monitoringu mikrosejsmicznego szczelinowania hydraulicznego pespektywicznych warstw łupków gazonośnych, występujących na znacznych głębokościach na północy Polski”. Praca prezentuje planowanie i optymalizację akwizycji przy pomocy modelowana pola falowego oraz przetwarzanie i częściową interpretacji danych z monitoringu stosunkowo wymagających pasywnych danych

sejsmicznych z otworu Wysin 2H/2Hbis.

## 2. Analiza rozdziałów rozprawy

Rozdział 1 „Wstęp” stanowi wprowadzenie do tematyki pracy: rewolucji w kierunku niekonwencjonalnych źródeł energii, w szczególności tych związanych z gazem łupkowym. Następnie Autor przedstawia ideę szczelinowania hydraulicznego (sekcja 1.2). Ta część jest przedstawiona niezwykle szczegółowo i nie sądzę by taki poziom szczegółów był konieczny biorąc pod uwagę tematykę pracy. Referowane koncepcje dotyczące propagacji i rozwoju szczelin mają się nijak do tematyki pracy, nie znajdują więc uzasadnienia obecności tego opisu w pracy (tj. części sekcji 1.2). Dla przykładu: Jest dyskutowana szerokość szczelin (zapytam: po co?), a nie ma np. absolutnie żadnej informacji jak ciśnienie porowe wpływa na powstawanie zjawisk sejsmicznych (choćby przez diagram Coulomb’a-Mohr’a), które są głównym elementem przetwarzania i interpretacji. Jest też dziwne zdanie które mówi o „minimalnym kierunku regionalnego naprężenia poziomego” (strona 16, wiersz 3-4). Sekcja 1.3 dotyczy techniki pomiarów mikrosejsmicznych. Ogólnie, zaskakuje brak referencji – a niektóre przedstawione fakty absolutnie tego wymagają (por. Załącznik A - komentarze szczegółowe). Koniec sekcji zawiera opis akwizycji i interpretacji danych monitorowania mikrosejsmicznego projektów szczelinowania hydraulicznego. Ten fragment jest opisany szczegółowo, choć wydaje się być nieco przeterminowany (brak np. referencji do metod Machine Learning oraz innych nowoczesnych technik przetwarzania etc.). Brak tych elementów i referencji wskazuje, że Autor bazował głównie na własnych doświadczeniach w tym temacie oraz nieco ograniczonej literaturze.

Sekcja 4.1 zawiera cztery tezy pracy:

- Teza (I) „Adaptacja techniki akwizycji otworowego monitoringu mikrosejsmicznego poprzez zastosowanie odbiorników szerokopasmowych w połączeniu z modelowaniem numerycznym pozwala na zaprojektowanie optymalnego rozstawu monitorującego”.
- Teza (II): „Wpływ anizotropii ośrodka oraz zmiana jego gęstości wynikająca ze szczelinowania hydraulicznego utrudnia wykorzystanie jednego modelu prędkości w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych”.
- Teza (III): „Ilość zidentyfikowanych zdarzeń mikrosejsmicznych zależy jest od własności petrofizycznych, w tym tłumienia warstw szczelinowanych oraz nadkładu.”.
- Ostatnia teza (IV): „Minimalizacja niepewności lokalizacji zdarzeń mikrosejsmicznych możliwa jest poprzez dobór odpowiednich parametrów pre-procesingu danych oraz korektę wyników lokalizacji zdarzeń metodą TGS z wykorzystaniem alternatywnych metod na podstawie danych syntetycznych i empirycznych”.

Tezy (I), (II) i (IV) są w mojej opinii wystarczająco dyskutowane w rozprawie. Teza (III) jest mniej niż skromnie zaprezentowana dyskutowana bardziej jakościowo niż ilościowo.

Podstawą postawienia ww. tez były trzy „fakty fizyczne” prezentowane przez Autora. Tutaj wskażę na pewne niedopowiedzenie w pierwszym punkcie, oryginalnie twierdzącym, że „Pęknięcia powstałe w wyniku szczelinowania (...) są źródłem fal sprężystych”. Właściwym byłoby raczej stwierdzenie, że „Pęknięcia (...) mogą być źródłem fal sprężystych”. Proces deformacji górotworu w wyniku szczelinowania związany jest oczywiście z procesami szybkiej relaksacji (jak trzęsienia ziemi), ale w (znacznie) przeważającej większości są to procesy powolne które nie produkują fal sejsmicznych wykrywalnych przez czujniki, ale raczej przez

inne oprzyrządowanie. W ekstremalnych przypadkach samo szczelinowanie (rozwieranie mas skalnych w typie I, jest często interpretowane jako asejsmiczne, a jedyne procesy sejsmiczne są związane z typem II lub III pęknięcia górotworu). Wynika to z różnic w budźcie energetycznym obu grup typów pęknięcia. Niektóre prace Maxwella (ten Autor jest cytowany w pracy), jak i np. Goodfellow et al. (2015) pokazują dobitnie jak duża jest rozbieżność w rozpraszaniu energii hydraulicznej na procesy sejsmiczne i asejsmiczne. Koniec rozdziału przedstawia krótki przegląd kolejnych części pracy.

Rozdział 2 przedstawia charakterystykę obszaru badań. Sekcje 2.1 i 2.2 na przedstawieniu lokacji badań i jego charakterystyce geologicznej. Ta ostatnie jest szeroko prezentowana wraz referencjami. Niestety, większość z przedstawionych informacji nie jest w szczególności sposobem wykorzystana w pracy. Dopiero sekcja 2.3 przedstawiające fizyczne właściwości warstw szczelinowanych wydaje się przydatna dla pracy, choć Autor skupił się na efektywności szczelinowania. W pracy geofizycznej, związanej tak mocno z sejsmologią, spodziewałbym się raczej skupienia na interpretacji sejsmo-mechanicznej, integrującej dane sejsmologiczne z wiedzą na temat pola naprężeń, geologią i tektoniką regionu, informacjami petrofizycznymi i z geofizyki otworowej (szczególnie na poziomie interpretacji zjawisk, a interpretacja ta jest wspomniana przez autora jako część pracy). Wydaje się, że Autor ma solidną wiedzę w tym zakresie, ale nie wykorzystuje jej w znaczący sposób w interpretacji uzyskanych danych sejsmicznych. Szkoda. Praca skupiona jest na modelowaniu, analizie danych sejsmicznych i zagadnieniu akwizycji / detekcji / jakości danych pomiarowych, nie rozumiem więc dlaczego Autor nie podjął się próby *przetłumaczenia* niektórych danych geologicznych na ich potencjalny efekt na właściwości aktywności sejsmicznej. Jedynie fragment dotyczący anizotropii ośrodka zawiera *wspomnienie* ich potencjalnego wpływu na propagację fal sejsmicznych - literatura na ten temat istnieje także w kontekście szczelinowania, ale nie jest cytowana (np. Boese et al., 2022 i referencje tamże). Sporo jest też zdań, które integrują różne dyscypliny wyłącznie jakościowo, np. „*Zauważalna jest relacja między prędkością fali P a porowatością, manifestująca się spadkiem prędkości fali P przy wzroście porowatości skały*”. Pomijając nawet brak referencji, to zdanie nie wnosi praktycznie nic do mojego stanu wiedzy w obszarze badań przytaczając tylko ogólnie znany fakt, który każdy sejsmolog i tak powinien wiedzieć. Poza tym, nie jestem w stanie określić, czy np. ten konkretny wynik jest efektem pracy Autora, czy po prostu referencją do kogoś innego (bo tej nie ma).

Rozdział 3 opisuje jakościowo studium modelowe wykonalności otworowego monitoringu mikrosejsmicznego w otworach Wysin. Sekcja 3.1 skupia się na geometrii sieci sejsmicznych celem optymalizacji lokalizacji zjawisk sejsmicznych. Niestety, nie jestem w stanie stwierdzić, czy tekst w tej sekcji jest opisem problemu, czy też opisuje analizę, którą Autor wykonał własnoręcznie dla badanego obszaru. Wynika to z tego, że sekcja 3.1 jest napisana bez żadnych konkretnych odniesień do uzyskanych wyników. Sekcja zawiera też znaczące, w mojej opinii, niedopowiedzenie. Dowiadujemy się bowiem że źródłem niepewności lokalizacji są różne czynniki, ale NIE sam rozkład przestrzenny czujników. Jest to dla mnie kompletnie niezrozumiałe w kontekście pracy, bo właśnie ten czynnik ma zasadniczy wpływ na jakość lokalizacji. Zapewne Autor miał tutaj na myśli wyłącznie monitoring otworowy o już z góry ustalonym (niezmiennym) układzie czujników w przestrzeni, ale taki brak precyzji powodują zamieszanie na etapie czytania pracy. Sekcja 3.2 skupia się na zagadnieniu tworzenia modelu prędkościowego ośrodka (tu interesujący i szczegółowy opis). Podobnie, sekcja 3.3 która dyskutuje anizotropię parametrów sejsmicznych w formacjach łupkowych jest napisana

szczegółowo i wyczerpująco. Obie sekcje stanowią solidne połączenie wiedzy geologicznej z aktywnym i pasywnym monitoringiem sejsmicznym. Sekcja 3.4 opisuje konstrukcję wstępnego modelu prędkościowego na podstawie danych z sejsmiki refleksyjnej z uwzględnieniem anizotropii ośrodka. Ostatnia sekcja 3.5 jest dyskusją testowania różnych układów akwizycji danych sejsmicznych w otworze, zapewne celem maksymalizacji detekcji zjawisk na dalszych odległościach. Cel tej analizy nie jest wspomniany wyraźnie, co powoduje ponownie niewielką dezorientację w zrozumieniu intencji autora i uzyskanych wyników podczas czytania. Na przykład: Wstępne modelowanie form falowych było wykonane bez uwzględnienia tłumienia. Argumentacja Autora jest w tym miejscu nieco niezrozumiała – kilkanaście wierszy wcześniej wspomina on bowiem o dużym wpływie tłumienia na propagację fal. Pytanie jest zatem, jaki jest cel tego modelowania w tym miejscu tekstu? Nieco później, modelowanie uwzględnienia już tłumienia, ale znowu ciężko jest wyciągnąć wniosek jaki jest tego cel. Dyskusja wyników modelowania jest kontynuowana w Sekcji 3.6, skupiając się na błędach lokalizacji jako takiej, jak rozumiem z uwzględnieniem tłumienia (tak?), ale bez uwzględnienia wpływu źródła sejsmicznego i czujników na detekcję. Błąd lokalizacji nie został zdefiniowany, więc trudno mi się do niego odnieść (wydają się jednak nierealistycznie małe zważywszy na rozdzielczość czasową sejsmogramów). Niemniej, większa część tego rozdziału jest ciekawa i wartościowa.

Rozdział 4 opisuje właściwą akwizycję i jakościową ocenę danych sejsmicznych zarejestrowanych podczas stymulacji otworu. Do tego fragmentu mam tylko kilka komentarzy i pytań naukowych, jak również komentarzy technicznych, które zawarłem w dalszej części recenzji.

Rozdział 5 przedstawia reprocessing i interpretację zarejestrowanych danych. Wprowadzenie w sekcjach 5.1 i 5.2 do przetwarzania danych jest przedstawione w interesujący sposób wraz z dużą ilością przykładów. Sekcja 5.3 opisuje dokładnie proces pikowania i asocjacji zjawisk, sekcja 5.4 dyskutuje kalibrację modelu prędkościowego, a 5.5 – lokalizację zjawisk. Sekcja 5.6 przedstawia obliczanie magnitudy momentu sejsmicznego i charakterystyki Gutenberga-Richtera dla całego katalogu. Sekcja 5.7 przedstawia obliczenia dwóch parametrów SRV i FCI. O ile w sekcji 5.6 obliczona wartość  $b$  została w jakiś tam sposób zinterpretowana, o tyle brak takiej dyskusji dla parametrów SRV i FCI, choć np. SRV może być w ciekawy sposób wykorzystany do obliczenia maksymalnej możliwej magnitudy. Brak nawet porównania tych dwóch parametrów z dostępnymi w literaturze. Rozdział 5.8 powiela na samym początku błąd (?) dotyczący rzekomej zgodności kierunku propagacji pęknięcia z SHMIN. Ogólnie, mam wiele technicznych komentarzy i pytań co do merytorycznej części rozdziału, które umieściłem w dalszej części recenzji.

Finalny rozdział 6 prezentuje podsumowanie pracy i wnioski.

### 3. Ocena rozprawy

Tematyka pracy doktorskiej mgr. inż. Eryka Świącha związana jest z przygotowaniem do optymalizacją pasywnego monitoringu sejsmicznego w wykorzystaniu modelowania fal, przetwarzaniem i interpretacją danych z szczelinowania otworowego. Optymalizacja sieci sejsmicznej w wykorzystaniu modelowania fal celem późniejszej maksymalizacji detekcji i jakości zarejestrowanych zjawisk pozwala uzyskać lepsze parametry źródłowe, w konsekwencji pozwalając na szerszą interpretację sejsmiczności w kontekście efektywności przeprowadzonego szczelinowania. Optymalizacja sieci pozwala także ograniczyć koszty

operatora. Temat rozprawy doktorskiej uważam z całą pewnością za interesujący. Sama praca niewątpliwie stanowi wkład w zrozumienie problemów i wyzwań wobec jakich stoi pasywny monitoring sejsmiczny szczelinowań hydraulicznych w północnej Polsce.

Autor pracy podjął się zadań (1) zoptymalizowania akwizycji danych z wykorzystaniem modelowania pola falowego, (2) przetwarzania i (3) interpretacji stosunkowo wymagających danych sejsmicznych. Chciałbym jednak podkreślić, że tylko (1) i w pewnym sensie (2) zostały wykonane wyczerpująco. Natomiast część interpretacyjna (3) danych mikrosejsmiczności jest w mojej opinii niepełna i sporej części jakościowa – uważam ogólnie, że pozostawia wiele do życzenia. Widać wyraźnie, że Autor czuje się znacznie lepiej w zagadnieniach modelowania i sprawach technicznych związanych z akwizycją danych sejsmicznych. Samo przetwarzanie (ogólnie poprawne), mogłoby być wykonane nieco lepiej (choć tutaj niejasnym jest zagadnienie czy Autor miał tak naprawdę możliwość własnoręcznego przetwarzania danych, czy raczej musiał bazować na dostępnym oprogramowaniu operatora, które zapewne ograniczyło możliwości przetwarzania). Natomiast interpretacja zjawisk jest w mojej ocenie ograniczona, co jest w sumie dosyć dziwne, bo a) Autor wyraźnie stworzył dobrej jakości katalog zjawisk mikrosejsmicznych, b) posiada szeroką wiedzę z dziedziny geologii / tektoniki, którą mógł by wykorzystać do interesującej autorskiej interpretacji, c) jak miemam z lektury tekstu posiadał dostęp do danych otworowych i informacji o naprężeniach które mogłyby prowadzić do interesującej interpretacji zjawisk w kontekście seismo-mechaniki. Niestety, interpretacja w sumie dość unikalnych danych sejsmicznych ogranicza się wyłącznie do minimalnej dyskusji zakresu głębokościowego zjawisk vs litologia, ich rozkładu powierzchniowego, luźnych uwag nt. rozkładu Gutenberga-Richtera i zależności wartości  $b$  G-R od typu aktywacji górotworu (tworzenie nowych szczelin vs reaktywacja), plus dosłownie kilku zdań o geometrii chmur sejsmicznych i ich jakościowej korelacji z polem naprężeń, oraz finalnie policzeniem kilku parametrów rzekomo charakteryzujących efektywność szczelinowania (rzekomo, bo Autor nie zadał sobie trudu dyskusji uzyskanych (interesujących!) wyników, ani nawet nie daje szansy czytelnikowi zapoznać się jak wartości niektórych parametrów zmieniają się w literaturze). Ogólnie, w wielu miejscach pracy analiza i interpretacja jest sprowadzona do komentarzy *mocno* jakościowych (por. uwagi szczegółowe), co czasami razi. Przykłady: „*Analizując rozkład głębokościowy zlokalizowanych zdarzeń mikrosejsmicznych w odniesieniu do wyznaczonych magnitud należy stwierdzić, że zdarzenia wykazywały mniej więcej ten sam zakres rozkładu wielkości.*” (s. 110) (Co to znaczy „mniej więcej” i tak naprawdę – o jaki parametr z rozkładu wielkości zdarzeń sejsmicznych chodzi?); „*głębokościowo zdarzenia mikrosejsmiczne (...) lokalizowane są bliżej interwału szczelinowanego, a ich pozycje wykazują bardziej naturalny charakter*” (s. 106) (tego, co znaczy „bardziej naturalny charakter” już się niestety nie dowiemy); „*Otrzymano wiarygodne lokalizacje hipocentrow indukowanych wstrząsów mikrosejsmicznych ze wszystkich jedenastu etapów szczelinowania.*” (s. 104) (dobrze, że są wiarygodne, ale ani błędy nie są podane, ani nie ma żadnej informacji nt. definicji jaka lokalizacja jest wiarygodna). Podobnych przykładów niejasności, niedopowiedzeń, jakościowej analizy, lub nawet braku jakiegokolwiek analizy wyników jest niestety więcej. Zastanawiam się, dlaczego Autor mający przecież solidne wykształcenie inżynierskie i, jak wnioskuję, duże doświadczenie praktyczne, jest w pewnych momentach aż tak nieprecyzyjny nawet na poziomie przekazywania podstawowych wyników (nie wspominając nawet o ich interpretacji).

Pomimo ww. niedociągnięć, samo modelowanie i przetwarzanie danych wydaje się Recenzentowi w ogólności dobrze przeprowadzone i uzasadnione, a poszczególne kroki, choć

czasem nieco kontrowersyjne i wymagające komentarza od strony Autora pracy, wydają się prowadzić do właściwych wniosków. Autor rozprawy wykazuje się umiejętnością modelowania danych syntetycznych oraz wykorzystania tej wiedzy do optymalizacji monitoringu mikrosejsmiczności. Finalnie, należy docenić współpracę Autora pracy z podmiotami przemysłowymi, włączając staż w firmie Seismik s.r.o. Należy się spodziewać, że wyniki przedstawione w pracy pozwolą na optymalizację akwizycji danych sejsmicznych i w konsekwencji umożliwią w przyszłości bardziej szczegółowe zrozumienie procesów szczelinowania górotworu w rejonie północnej Polski.

#### **Komentarze do strony technicznej pracy:**

- W rozdziale 1 a także w dyskusji i interpretacji wyników rzuca się w oczy niechęć autora do cytowania innych prac.
- W polskiej typografii przyjęło się, że akapit zaczyna się wcięciem. Ewentualnie można też zastosować odstęp pomiędzy akapitami (np. 6pt), ale wtedy następny akapit zaczyna się bez wcięcia.
- Wartości głębokości (depth) tradycyjnie powinny być dodatnie (wektor w kierunku środka Ziemi) (np. wstawka w Fig. 2.1). Ewentualnie można zamienić na „Wysokość n.p.m.”, albo TVDSS (wyjaśnić skrót!). Autor w Fig. 1.4. wyraźnie sugeruje, że składowa Z jest skierowana w kierunku środka Ziemi, więc jest pewna niekonsekwencja z jego strony w innych figurach. Prosiłbym zatem o ujednoczenie tego w pracy.
- Trochę razi *autorski* format cytowania. Zamiast listowania pojedynczych referencji w nawiasach kwadratowych, sugerowałbym umieszczenie ich razem, tzn. [A, XXXX] i [B, YYYY] → [A, XXXX; Y, YYYY] (zakładając porządek chronologiczny).
- Numeracja figur w rozdziale 5 jest krótko rzecz biorąc fatalna i świadczy o opieszałości Autora w przygotowaniu pracy. Niektóre figury mają taki sam numer, brak jest konsekwencji w numerowaniu. Utrudniło to skutecznie analizę pracy w tym rozdziale.
- Skoro już mowa o figurach, to niektóre mają naprawdę bardzo słabą jakość (np. Fig. 4.5, 5.4 i inne). Opisy osi są często małe, brak jest oznaczenia poszczególnych komponentów figur (np. (a), (b) i (c)), brak jest czasami opisów osi (np. Fig. 3.7, 3.8, 3.11, 3.12, i inne). Ponadto, wybór prezentacji niektórych parametrów jest co najmniej kreatywny, choć bardziej chciałoby się powiedzieć – o wątpliwej logice. Na przykład dla Fig. 3.14 rozmiar kółek odzwierciedla ilość czujników, choć pierwsze co przychodzi na myśl, to to, że rozmiar odzwierciedla np. min i max błędu lokalizacji. W miarę możliwości, prosiłbym o przeglądnięcie wszystkich figur i uzupełnienie brakujących elementów / poprawę jakości.
- W kilku figurach etapy szczelinowania są podkreślone osobnym kolorem. Niestety, brak jest konsekwencji w tym kolorowaniu (inne palety), a na niektórych rysunkach brakuje nawet skali koloru, co uniemożliwia jakąkolwiek korelację pomiędzy etapem szczelinowania a zjawiskami.
- Kompletnie nie rozumiem oznaczeń przy równaniach typu „//4”. Wygląda to jak oznaczenie numeru równania – bardzo specyficzny sposób numeracji.
- Zapis matematyczny w tekście można by usystematyzować. Zmienne powinny być pisane kursywą, a wszystkie pozostałe znaki ‘normal face’. Na przykład, prawidłowy zapis magnitudy moment sejsmicznego to  $M_w$  (kursywa dla M, bo to zmienna, ale już W

to tylko oznaczenie typu magnitudy, czyli „normal face”). Inny przykład: amplituda fali na stacji  $j$  to  $A_j$  (kursywa dla  $A$  i dla „ $j$ ”)

- W komentarzach szczegółowych wspominałem kilka słów, które nie występują w języku polskim w kontekście użytym przez Autora, a są raczej kalką z języka angielskiego. Można je z powodzeniem zamienić na odpowiednik w języku polskim.

Pozostałe komentarze techniczne zawarłem w sekcji „komentarze szczegółowe” na końcu recenzji. Proszę o uwzględnienie wszystkich komentarzy w ostatecznej wersji pracy.

### Komentarze i pytania do strony merytorycznej

Prosiłbym o wyczerpującą odpowiedzi na poniższe pytania i komentarze i przedstawienie ich w dalszej części przewodu doktorskiego:

1. W rozdziale 3.5 pierwsze modelowanie pola falowego nie uwzględnia wpływu tłumienia, choć modelowanie to jest przeprowadzone celem „*określenia efektywności lokalizacji*”. To trochę zaskakująca decyzja. Autor wspomina, że tłumienie ośrodka w obszarze badań wpływa na jakość zapisów, wpływa więc w oczywisty sposób na jakość pikowania, a więc i na jakość lokalizacji. Modelowanie uwzględnia zdaje się tutaj wpływ tłumienia na amplitudy, ale nie na charakterystykę częstotliwościową. Czy to znaczy, że utrata wysokich częstotliwości może być pominięta? Zaskakujące, zważywszy na silne tłumienie fal w obszarze badań ( $Q=20$ ). Prosiłbym w przekonujący sposób przedyskutować ten problem, także z uwzględnieniem kolejnych dwóch elementów.

Autor wspomina w dwóch zdaniach na stronie 61, że „zauważalny jest (...) niekorzystny efekt wygaszania amplitud dla fali P (...) Wynika to z zastosowania (...) źródła ścinającego”. Skoro jest on niekorzystny dla pikowania, to może warto by było coś nieco więcej napisać na ten temat. Prosiłbym o szczegółową analizę jaki mechanizm został założony (i dlaczego taki), jak to się ma do naprężeń albo/i informacji z geologii, tektoniki i geofizyki otworowej, oraz jaki jest (ilościowo!) wpływ mechanizmu na jakość rejestracji i lokalizacji.

kontynuując temat źródła, modelowanie form falowych zostało przeprowadzone dla, jak rozumiem, jednej częstotliwości dominującej sygnału: 300 Hz (czyli zjawiska o magnitudzie mniej więcej  $M=-1$ ). Nie jest jednak wspomniane czy relacje skalowalności pomiędzy częstotliwością dominującą a amplitudą formy falowej są zachowane (np. Kwiatek et al., 2011; Kwiatek i Ben-Zion, 2016). Proszę przedyskutować zatem jak źródło wpływało na amplitudę zjawisk. Ogólnie, trudno jest wyciągnąć z tego modelowania jakieś szersze wnioski co do tego czy szersze spektrum zjawisk obserwowanych podczas szczelinowania będzie tak naprawdę zarejestrowane przez zestaw i jaka będzie jakość lokalizacji dla całego spektrum zjawisk (w sensie różnych magnitud). Tu też prosiłbym o szersze ilościowe wyjaśnienie.

Chciałbym także usłyszeć przynajmniej jakościową dyskusję potencjalnego wpływu czujników na rejestrowanie zjawisk sejsmicznych o magnitudach -2 – 0 (vide Kwiatek et al., 2016). Mają one wpływ, czy nie?

Finalnie, jak Autor modelował szum na sejsmogramach syntetycznych?

2. „Nadrzędnym celem tego etapu projektu (przetwarzania danych sejsmicznych – przyp. recenzenta) było otrzymanie wiarygodnych lokalizacji hipocentrow zarejestrowanych zdarzeń mikrosejsmicznych, obliczenie ich magnitud oraz interpretacja uzyskanych

wyników” pisze Autor we wprowadzeniu do Rozdziału 5. Rzeczywiście, przetwarzanie wykonane przez Autora pracy pozwoliło uzyskać stosunkowo duży katalog sejsmiczny z wydaje się dobrymi jakościowo lokalizacjami i oszacowaniami magnitudy momentu sejsmicznego. Do przetwarzania nie mam szczególnych komentarzy poza kilkoma technicznymi (zob. poniżej i w komentarzach szczegółowych). Mam też kilka krytycznych uwag i pytań do części interpretacyjnej.

Przetwarzanie:

- a. Autor wspomina z „spójności znakowań fal P i S” jako kryterium pikowania. Czyli spodziewany mechanizm zjawiska był uwzględniany w jakimś sensie? Jak i dlaczego?
- b. Czas przyścia fali P był pikowany na składowej Z, a czas fali S na składowej horyzontalnej Y. Ale z dalszej części wywodu wnioskuję, że pikowanie było wykonane dla komponent LQT (?)
- c. Kalibracja modelu prędkościowego: „Modele kalibrowano głównie z wykorzystaniem strzałów perforacyjnych”? Co innego było zatem wykorzystane?
- d. Wynikiem kalibracji modelu prędkości były pewne, jak rozumiem z późniejszej analizy lokalizacji, znaczące, zmiany lateralne prędkości ośrodka zarówno dla fal P i fal S. Proszę przedyskutować i zinterpretować zatem ich zmienność lateralną i kontekście dostępnych danych. Z analizy rysunków ciężko cokolwiek wnioskować, ale wygląda to tak, jakby prędkości fal P i S w warstwach wraz z odległością od pięty otworu były dość losowo rozrzucone dla poszczególnych etapów szczelinowania. To samo dotyczy zresztą parametrów anizotropii. Czy te rezultaty mają jakiegokolwiek uzasadnienie, kiedy porównać je z danymi z litologii, sondowań otworowych, tektoniki? A może jest tak, że parametry (szczególnie anizotropii) kompletnie nie odzwierciedlają rzeczywistych wartości ośrodka, a są jedynie efektem minimalizacji funkcji błędu. Proszę o interpretację. Ponadto: wygląda tak, jakby kalibracją spowodowała ogólnie spadek prędkości w obszarze eksploatacji w porównaniu to wstępnego modelu. Jakiś komentarz? Interpretacja?
- e. Autor pokazuje wyższość modelu anizotropowego nad modelem izotropowych. Ale: model anizotropowy ma więcej parametrów, więc naturalnie będzie lepiej odzwierciedlał dopasowanie do określonych lokalizacji (vide punkt d powyżej i dyskusja parametry BIC w komentarzach szczegółowych) jeśli wybierzemy identyczne kryterium jakości. Zatem pytanie jest: czy poprawa modelu jest znacząca, biorąc pod uwagę fakt, że model jest opisywany przez więcej parametrów? Dodatkowo, mam inne pytanie: A jaka jest jakość (accuracy) estymacji rzeczywistej pozycji otworu i strzałów kalibracyjnych? Moje (przyznam, niewielkie) doświadczenie w tym temacie sugeruje, że podane niepewności rzędu kilku-kilkunastu metrów są naprawdę optymistyczne dla głębokiego otworu. Pomiary przebiegu otwory były wykonane z użyciem jakich metod?

Interpretacja:

- f. Jakie są błędy lokalizacji w modelu anizotropowym i co to znaczy, że ich „pozycje wykazują bardziej naturalnych charakter”. Z ciekawości: dlaczego Autor nie



- spróbował zrelokalizować zjawisk z wykorzystaniem metody double-difference (Waldhauser i Ellsworth, 2000)?
- g. Czy widoczna jest propagacja zjawisk w czasie od otworu dla poszczególnych etapów szczelinowania? Jak to się ma do jakości lokalizacji? Jak ta propagacja, jeśli występuje, ma się do np. do „Diffusion law” (np. Shapiro, 2015)?
  - h. Magnituda: Jakie poprawki zastosowano do mechanizmu (wzór radiacyjny) i jaki w końcu zastosowano współczynnik tłumienia (w tekście  $Q_s=110$  dla fali S, w tabelce  $Q_s=100$ ).
  - i. Autor napisał, że „silniejsze zdarzenia zaobserwowano jedynie w formacji celu geologicznego”. Może jakaś szersza interpretacja ilościowa agregująca informację z sejsmiki z wiedzą geologiczną, z otworów i tektoniki?
  - j. Autor raportuje ogólną wartość  $b$  relacji G-R równą 1.9, interpretując ją, za Eisner, jako reaktywacja szczelin. Dodatkowo, rozkład przestrzenny zjawisk wskazuje na reaktywację sieć spękań w określonym kierunku. Czy Autor może zatem potwierdzić z wykorzystaniem niezależnych danych, np. z otworu/tektoniki/kierunku naprężeń, czy kierunek szczelin / uskoków w obecności określonego pola naprężeń świadczy rzeczywiście o reaktywacji uskoków / spękań w typie II (shear), które są w krytycznie naprężone (?), czy raczej tworzone są nowe szczeliny mające trend zgodny z SHMAX. Kontynuując, czy są jakieś większe odchylenia wartości  $b$  (z uwzględnieniem błędów) od podanej wartości średniej i czy można jest skorelować z innymi parametrami geologicznymi / tektonicznymi / petrofizycznymi z otworu?
  - k. Na s. 124 Autor pracy łączy magnitudę z zagadnieniami bezpieczeństwa. Niestety, nie rozwija tego tematu w ogóle. Zatem: Jak ma się maksymalna obserwowana magnituda do maksymalnej magnitudy estymowanej z modeli deterministycznych, np. McGarr (2014) czy van der Elst et al., (2016)? Jaki wpływ ma błąd estymacji magnitudy na stan zagrożenia sejsmicznego? Jaki wpływ mają obserwowane magnitudy na bezpieczeństwo robót? Czy jest jakieś szersze zagrożenie, np. istnienie większych uskoków w pobliżu, istnienie anomalnych naprężeń, potencjał do „uruchomienia” jakiegoś większego uskoku na skutek zmiany ciśnienie porowego, efektów poro-elastycznych? Skoro Autor wspomina magnitudę w kontekście bezpieczeństwa, może warto by coś więcej o tym napisać?
  - l. Autor oblicza dwa parametry, fracture complexity index (FCI) oraz stimulated reservoir volume (SRV). Jeśli chodzi o samą estymację, to mam wątpliwości co do założenia  $M > -2$  dla wszystkich etapów przy obliczeniu SRV. Z figury 5.18 wyraźnie widać, że dla  $R > 1000$  metrów katalog nie jest kompletny. Trudno więc ocenić, czy obliczone wartości SRV dla poszczególnych etapów są rzeczywiście dobrze „znormalizowane”. Poza tym, nie za bardzo jestem w stanie wywnioskować, jaka jest ostateczna opinia autora nt. wiarygodności tego parametru. Wydaje się, że autor wskazuje sporą arbitralność estymaty SRV w zależności od metody/parametryzacji chmury. Jakiś szerszy komentarz? Jakie ten parametr ma w ogóle zastosowanie?

Rozszerzę teraz dyskusję SRV w kontekście zagrożenia sejsmicznego, które

autor wspomina nieco dalej. Rozmiar chmury zjawisk i jej wymiary (w sumie, w kontekście parametrów wejściowych do obliczania FCI) można skorelować z maksymalną spodziewaną magnitudą (Shapiro et al., 2011). Jak zatem wygląda oszacowanie maksymalnych magnitud dla badanego obszaru? Jak to się ma do szacowanych magnitud z wykorzystaniem metod deterministycznych (punkt k).

Finalnie, obliczone wartości FCI wskazują na, za Autorem, „średnią złożoność POWSTAŁYCH w czasie prac szczelinowania hydraulicznego sieci spękań”. Pierwsze: czemu teraz „powstałych”, skoro wcześniej interpretacja była „reaktywowanych” (pkt. (j))? Czy można przedyskutować uzyskane wartości FCI i porównać ją do wartości FCI obliczonych dla innych obszarów w kontekście różnic pomiędzy właściwościami petrofizycznymi łupków w Polsce i w innych krajach? Co tak naprawdę znaczy „średnia złożoność” i czy zmienność tego parametry wiarygodnie skorelować z innymi parametrami dostępnymi np. z otworu. Dalsza dyskusja i interpretacja byłaby wskazana.

#### 4. Podsumowanie

Mimo uwag krytycznych, które wydają się możliwe są do skorygowania w toku następnych etapów przewodu doktorskiego, uważam, że wyznaczone cele rozprawy zostały zrealizowane. Recenzowana praca prezentuje oryginalne osiągnięcia badawcze Autora, które mają znaczenie użytkowe i metodyczne. Analiza i interpretacja wymagających danych świadczy o praktycznej wiedzy Autora i umiejętności prowadzenia badań. Jego praca stanowi więc „oryginalne rozwiązanie projektu naukowego” w świetle art. 13 ust. 1 (Dz.U. 2017 poz. 1789). Tematyka pracy jest istotna dla optymalizacji monitoringu mikrosejsmicznego szczelinowań hydraulicznych w rejonie północnej Polski.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. inż. Eryka Świącha pt. „Otworowy monitoring mikrosejsmiczny szczelinowania hydraulicznego warstw z niekonwencjonalnymi złożami gazu ziemnego. Optymalizacja metod akwizycji, przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych” spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 poz. 1789). Wnoszę więc o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Eryka Świącha do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Grzegorz Kwiatek  
GFZ German Research Centre for Geosciences  
Section 4.2 Geomechanics and Scientific Drilling  
Telegrafenberg, D14473 Potsdam, Germany

## Załącznik A - Komentarze szczegółowe:

### Strona 16:

*“w kierunku prostopadłym do minimalnego kierunku regionalnego naprężenia poziomego.”*

Co to znaczy „minimalny kierunek regionalnego naprężenia poziomego”?

### Strona 23:

*„jednak najlepiej rozwiniętym i najczęściej stosowanym w praktyce przemysłowej jest monitoring otworowy.”*

Brak referencji, trudno więc się odnieść do prawdziwości tego zdania.

*„Niestety taka konfiguracja pomiarowa jest wrażliwa nawet na niewielkie zmiany modelu prędkość”*

Brak referencji, trudno więc się odnieść do prawdziwości tego zdania.

### Strona 25:

*„Należy zauważyć, że w przypadku danych powierzchniowych wykorzystywana jest jedynie energia fali P, natomiast w przetwarzaniu danych otworowych wykorzystywana jest zarówno informacja o fali P jak i fali S.”*

To nie jest w ogólności prawda, sugeruję to zmienić. Wydaje się, że zależna jest to od stopnia zaawansowania operatora monitoringu sejsmicznego. We wszystkich projektach hydraulic stimulation w których uczestniczyłem wykorzystywane były fale P i S na etapach samego monitoringu sejsmicznego online (i oczywiście w post-processingu).

### Strona 26:

*„Bardziej szczegółowe informacje jakie można uzyskać na podstawie analizy lokalizacji chmury zdarzeń mikrosejsmicznych, ich magnitud oraz mechanizmów wzbudzenia dotyczą rozmiarów oraz złożoności powstałych pęknięć skalnych, a także ich lokalizacji w stosunku do punktu załączania”*

Brak referencji.

*„Anomalny rozkład przestrzenny lokalizowanych zdarzeń mikrosejsmicznych wskazywać może na aktywację mikro uskoków, niewidocznych na zdjęciach sejsmiki aktywnej.”*

Co to znaczy anomalny? Proszę wyjaśnić.

*„Połączona i zintegrowana analiza danych mikrosejsmicznych z danymi pochodzącymi z innych metod geofizycznych pozwala na pełny opis geomechaniczny analizowanego złoża”*

Co Pan rozumie pod pojęciem „geomechaniczny” – proszę wyjaśnić w tekście.

**Strona 27:**

Teza II: W jaki sposób tłumienie wpływa na czas przyścia fal?

**Strona 28:**

*„W niniejszej pracy zaprezentowano jeden z pierwszych eksperymentów mikrosejsmicznych w polskich warunkach geologicznych.”*

Proszę uszczególnić, że chodzi o monitoring szczelinowania. To nie jest prawda w ogólności. Monitoring mikrosejsmiczny jest niezwykle popularny w Polsce, np. w kopalniach.

*„z wykorzystaniem rzeczywistego modelu prędkości.”*

To model może nie być rzeczywisty?

**Strona 30:**

Fig 2.1. Ujemna głębokość. Głębokość tradycyjnie jest dodatnia. Proszę poprawić w tej i innych figurach.

**Strona 39:**

*„[Modliński & Szymański, 1997] oraz [Modliński & Szymański, 2008].”*

To trochę autorski system referowania. Proponuję zamienić na [Modliński & Szymański, 1997, 2008]. Oczywiście dla innych referencji też.

**Strona 43:**

*„pełna charakterystyka zdarzeń mikrosejsmicznych, jak na przykład określenie rozkładu sił w hipocentrum”*

To nie jest pełna charakterystyka, jest znacznie więcej parametrów źródłowych. Może lepiej „bardziej szczegółowa”, „z wykorzystaniem tensora moment sejsmicznego” etc.

*„Materiały literaturowe dowodzą, że (...)”*

Jakie materiały? Referencje?

**Strona 46:**

Np. [Maxwell, 2009; Pie et al., 2009; Jansky et al., 2010].

**Strona 47:**

*„Gorzej rozpoznane są również właściwości fizyczne łączące pomiary sejsmiczne z ich właściwościami strukturalnymi.”*

Może trochę bardziej konkretnie o jakie parametry chodzi?

**Strona 48:**

*„Powstało wiele opracowań traktujących o znaczeniu wykorzystania anizotropowego modelu prędkości w przetwarzaniu danych geofizycznych.”*

Jakich? Jakież referencje? Jakież podsumowanie?

**Strona 53:**

Skrót TVDSS nie jest wyjaśniony.

**Strona 60:**

*„Dla określenia efektywności lokalizacji z wykorzystaniem testowanych geometrii pominięto wielkości tłumienia  $Q$ , tj. przyjęto  $Q_p=Q_s=2000$ ”*

W mojej opinii, to trochę zaskakujący wybór. Tłumienie wpływa na jakość pikowania, zatem także na jakość lokalizacji. Także wybór czujników i ich charakterystyka wpływa na jakość lokalizacji. Zaskakujące jest trochę, że te parametry nie zostały uwzględnione. Dlaczego?

**Strona 60:**

*„etapy filtracji i kondycjonowania danych,”*

Moim zdaniem średnia kalka z języka angielskiego. Za słownikiem PWN języka polskiego (<https://sjp.pwn.pl/slowniki/kondycjonowanie.html>): Ma Pan na myśli „doprawiać ziarno przed przemiałem na mąkę lub przed przerobem na kaszę” czy «określać stopień wilgotności surowców i wyrobów włókienniczych».

**Strona 62:**

„próba kontrolna dowiodła, że możliwym jest zlokalizowanie wygenerowanych syntetycznych zdarzeń mikro-sejsmicznych w ich rzeczywistych pozycjach”.

Nie do końca. Zarówno zmienność charakterystyki źródła, jak i tłumienia, nie zostały uwzględnione. Proszę uszczególnić wnioski.

**Strona 68:**

„Układ pomiarowy wykorzystany w trakcie akwizycji składał się z 18 trójkomponentowych czujników Slimwave firmy Sercel.”

Proszę podać istotne szczegóły czujników tutaj. Brak naprawdę podstawowych informacji nt. Częstotliwości naturalnej, próbkowania (jest później), filtrach, paśmie przenoszenia etc.

**Strona 69:**

*„Problem ten dostrzeżono już na etapie modelowania konstruując układ pomiarowy zdolny do wykrycia zdarzeń mikrosejsmicznych już z pierwszych (najbardziej odległych od układu pomiarowego) etapów szczelinowania.”*

Modelowanie nie uwzględniało zmienności źródła, a zostało wykonane dla, jak rozumiem, jednego typu źródła o nieznanach bliżej parametrach (poza wspomnianą częstotliwością dominującą). Trudno więc wnioskować, dlaczego Autor tutaj twierdzi, że układ pomiarowy zdolny jest do rejestracji zjawisk mikrosejsmicznych w szerszym zakresie magnitud.

**Strona 70:**

*„Średnie ciśnienie pompowania podczas prac szczelinowania wynosiło około 700 bar natomiast średni wydatek tłoczenia wyniósł około 20 m<sup>3</sup>/min, co stanowi wartości nie odbiegające od normy.”*

Niestety, czytelnik nie jest sobie w stanie wyrobić opinii co jest normą a co nie. Brak referencji, brak jakiegokolwiek punktu odniesienia.

**Strona 74:**

*„Nadrzędnym celem tego etapu projektu było otrzymanie wiarygodnych lokalizacji hipocentrow zarejestrowanych zdarzeń mikrosejsmicznych, obliczenie ich magnitud oraz interpretacja uzyskanych wyników.”*

Tak, ale dla późniejszych parametrów takich jak SRV albo FCI interpretacja jest szczątkowa. Właściwie, to nie istnieje, poza przedstawieniem ostatecznej wartości, która nie ma odniesienia do niczego.

*„W przypadku danych otworowych wykorzystywana jest zarówno energia zapisana w postaci fali P i S, w przeciwieństwie do rejestracji powierzchniowych, gdzie bazuje się jedynie na informacji zapisanej w postaci fali podłużnej.”*

Jeszcze raz: To nie jest prawda. Będę trochę złośliwy i powiem, że wygląda to trochę tak, jakby Autor czerpał swoją wiedzę z jednego artykułu sprzed 10-15 lat.

**Strona 79:**

*„Różnica pomiędzy najmniejszą i największą wartością dla danego czujnika nie przekracza kilku stopni, co dowodzi dobrej jakości zarejestrowanych sygnałów.”*

Trochę dziwny wniosek. Dlaczego dowodzi to, że sygnały są dobrej jakości? Ja bym napisał, że czujniki nie obracały się znacząco podczas całego eksperymentu.

Fig. 5.3:

Zaskakujące jest to, że nawet sąsiadujące czujniki potrafią się obrócić o 90 stopni, np. 4 i 5, albo 3 i 4. Jakiś komentarza, wyjaśnienie? Czy może ja źle interpretuję ten rysunek?

*„Linia fioletową zaznaczono różnicę w obliczanych kątach rotacji dla danego czujnika”*

Proszę wyjaśnić co to znaczy.

*„Jednak przede wszystkim proces ten umożliwił określenie poprawnej lokalizacji horyzontalnej lokalizowanych w dalszych etapach prac zdarzeń mikrosejsmicznych.”*

Dlaczego? Poprawa signal-to-noise ratio?

**Strona 82:**

*„Z licznych danych literaturowych wynika, że długość okna krótkiego powinna być równa od dwóch do trzech okresów dominujących sygnału mikrosejsmicznego”*

Których „licznych”? Nie ma tu nawet jednej referencji.

**Strona 84:**

*„(...) błędy w dokładności wyznaczania czasów pierwszych wstąpień fal użytecznych są główną składową niepewności wyznaczania lokalizacji zdarzeń mikrosejsmicznych.”*

Ten przyczynek do błędów nie był wspomniany wcześniej jako główny (?).

**Strona 85:**

*„Zwracano szczególną uwagę na spójność znakowań pomiędzy zarówno falami P i S jak i pomiędzy poszczególnymi odbiornikami dla pojedynczego zdarzenia mikrosejsmicznego.”*

Dlaczego takie kryterium było ważne? Czy to wynika z modelowania fal? Co z oczekiwanymi mechanizmami źródła i radiation pattern? Dużo pytań, brak na nie odpowiedzi w tekście.

*„Czasy przyścia fali podłużnej znakowano na komponencie pionowym (Z), natomiast czasy przyścia fali poprzecznej znakowano na składowej horyzontalnej (Y) co wynika z faktu maksymalizacji energii tych fal po procesie rotacji na wspomnianych składowych.”*

Trochę zaskakujący wybór, który wymagałby jednak komentarza. Dla wspomnianej geometrii bardziej bym oczekiwał, że fala P jest lepiej rejestrowana na poziomych czujnikach. Czy wybór autora wynika z przeprowadzonych modelowań propagacji, własności czujników? Dlaczego nic na temat tego nieoczywistego wniosku nie jest napisane?

**Strona 90:**

*„Ponadto strategia ta daje dobre wyniki lokalizacji zdarzeń mikrosejsmicznych w ośrodkach charakteryzujących się znaczną anizotropią prędkości.”*

Model prędkościowy był kalibrowany dla każdego etapu szczelinowania. Trudno wywnioskować, czy wynika to z tego, że własności formacji zmieniają się lateralnie, czy jest to związane z ograniczeniami modelu propagacji fal albo innych czynników.

Jaka jest jakość mapowania otworu metodami magnetycznymi?

**Strona 92:**

*„Błąd lokalizacji, rozumiany jako różnica pomiędzy rzeczywistym położeniem strzałów kalibracyjnych a ich lokalizacją uzyskaną w trakcie kalibracji modelu, był niewielki i mieścił się w granicach niepewności lokalizacji.”*

Niezrozumiałe. Czy chodzi o to, że estymowana lokalizacja wstrząsów (wraz z błędami tego oszacowania) mieści się mniej więcej w rzeczywistej lokalizacji wstrząsu (wraz z jej niepewnościami wynikającymi z błędów pomiarów np. magnetycznych).

Fig 5.11 Z obrazka wnioskuję, że początkowy model zawsze miał zaniżone prędkości, tak?

Fig. 5.12. Wygląda na to, że zmiany lateralne nie zmieniają się regularnie, ale raczej oscylują wokół pewnych średnich wartości. Dlaczego tak jest? Jaka jest tak naprawdę rozdzielczość estymacji prędkości.

Fig. 5.10 (i inne podobne). Jakie jest znaczenie poziomej linii?

**Strona 94:**

*„5.17. Błąd lokalizacji w tym wariancie kalibracji był również niewielki i mieścił się w granicach niepewności lokalizacji”*

Jak wyżej, nie rozumiem.

*„Średnia różnica w lokalizacji horyzontalnej względem pozycji rzeczywistych sięga 6.6 m, natomiast głębokościowej 2.2 m”,*

Wygląda na to (proszę mnie poprawić), że błąd lokalizacji strzałów kalibracyjnych jest na poziomie rozdzielczości seismogramów (2000 Hz). Czyli oznacza dla mnie, że model jest tak sparametryzowany, że jest Pan w stanie odzwierciedlić lokalizację strzału 1:1. Nie oznacza to jednak, że model jest wiarygodny. Martwią mnie dość losowe lateralne zmiany prędkości. Pytanie, czy mają one uzasadnienie w niezależnych danych (np. z otworu, profilowani prędkości w otworze, obecności stref spękań etc.)?

*„co dowodzi większej dokładności ich lokalizacji niż w przypadku modelu izotropowego.”*



To dobrze, ale model anizotropowy ma więcej wolnych parametrów, więc w sumie oczekiwane jest, że można uzyskać lepsze „dopasowanie”. Istnieją formalne kryteria (np. Bayesian Information Criterion) które pozwalają obiektywnie stwierdzić który model ma mniejsze błędy biorąc pod uwagę ilość wolnych parametrów.

#### **Strona 103:**

*„W wyniku przetwarzania izotropowego otrzymano lokalizacje hipocentrów indukowanych zdarzeń mikrosejsmicznych (Fig. 5.21) odpowiadające naturalnemu systemowi naprężeń w omawianym rejonie badań.”*

Nie rozumiem. Proszę rozwinąć myśl. Tak nawiasem mówiąc, doskwiera brak informacji o rozkładzie naprężeń na poziomie szczelinowania – szczególnie że Autor referuje do wartości SHMAx w kilku miejscach pracy.

„liniowanie”

Takie słowo istnieje w języku polskim, ale nie sądzę by mogło być tutaj użyte.

#### **Strona 104:**

Fig. 5.14: Brak oznaczenia który kolor odpowiada któremu etapowi szczelinowania.

Dlaczego lokalizacje są ograniczone w głębokości? Nie ma na ten temat słowa w opisie wyników.

*„Otrzymano wiarygodne lokalizacje hipocentrów indukowanych wstrząsów mikrosejsmicznych ze wszystkich jedenastu etapów szczelinowania.”*

Proszę zdefiniować co Autor rozumie albo interpretuje jako „wiarygodne” lokalizacje.

#### **Strona 106:**

*„(...) głębokościowo zdarzenia mikrosejsmiczne zlokalizowane z wykorzystaniem modelu anizotropowego lokalizowane są bliżej interwału szczelinowanego, a ich pozycje wykazują bardziej naturalny charakter.”*

Podobnie jak powyżej, co znaczy, że „wykazują bardziej naturalny charakter”. Proszę o interpretację a nie o jakościowy opis!!!

A pro po: Czy widać propagację zjawisk w przestrzeni wraz z czasem szczelinowania dla poszczególnych interwałów?

#### **Strona 108:**

Co oznacza index  $i$  w równaniu?

*„W pierwszym kroku należało obliczyć przemieszczenie trasy sejsmicznej (jako pierwsza całka sygnału)”*

Horror. Przemieszczenie (drgań) gruntu. Prędkość drgań gruntu.

**Strona 110:**

*„Analizując rozkład gęstościowy zlokalizowanych zdarzeń mikrosejsmicznych w odniesieniu do wyznaczonych magnitud należy stwierdzić, że zdarzenia wykazywały mniej więcej ten sam zakres rozkładu wielkości.”*

Wszystko w porządku, tylko dlaczego nie ma odnośnika do odpowiedniej Figury? Co to znaczy „mniej więcej”

*„Analizując rozkład gęstościowy zlokalizowanych zdarzeń mikrosejsmicznych w odniesieniu do wyznaczonych magnitud należy stwierdzić, że zdarzenia wykazywały mniej więcej ten sam zakres rozkładu wielkości.”*

Co znaczy w tym zdaniu „zakres rozkładu wielkości”? Chodzi o rozkład G-R, wartość  $b$ , wartości magnitudy? Nieprecyzyjne! Nie rozumiem też określenia „mniej więcej”? Na wydziale GGiOŚ która kształci inżynierów?

*„Ponadto zauważalny jest podobny rozkład magnitud dla wszystkich etapów szczelinowania hydraulicznego, z wyjątkiem pierwszych dwóch, które najprawdopodobniej są związane z ograniczeniami technicznymi prowadzonej obserwacji (Fig. 5.25).”*

Ponownie, co to znaczy? Jakie ograniczenia techniczne?

O ogóle, brakuje niesamowicie jakiejś szerszej analizy wyników.

**Strona 111:**

*„metodą najmniejszych kwadratów”*

Niestety, wybrał Pan najgorszą chyba metoda estymacji parametru  $b$ . Metoda maksymalnej wiarygodności połączona z goodness-of-fit method (Woessner & Wiemer, 2005) albo b-positive method (van der Elst, 2021), to obecnie „state-of-the-art”. A pro po, jakie są błędy oszacowania wartości  $b$ ?

**Strona 116:**

Parametry SRV i FCI. Krótka: Po co zostały policzone, skoro nie jest to w żaden sposób interpretowane, porównane z innymi obszarami, parametrami hydraulicznymi. Jest naprawdę bardzo dużo możliwości interpretacji tych wartości, np. w kierunku hazardu sejsmicznego, wydajności procesu sejsmicznego, maksymalnej magnitudy etc.

**Strona 117:**

*„Mediana wartości azymutu wyniosła 142° co jest zbieżne z lokalnymi mapami kierunku SHmax.”*

Cieszę się, że tak jest, ale w całej pracy nie ma słowa wstępu na temat pola naprężeń, a w tym zdaniu nie ma nawet referencji by zobaczyć czy te pęknięcia są wzdłuż SHMAX (nowe pęknięcie) czy w zakresie +/-30 stopni (reaktywacja?)

**Strona 123:**

*„Zaobserwowana średnia wartość współczynnika dobroci utworów w otworze Lubocino – 2H była niższa o około 10 dla fali P i 15 dla fali S w stosunku do analogicznych warstw w otworze Wysin – 2H.”*

Czytelnik nie miał szans się dowiedzieć jaka jest absolutna wartość współczynników dobroci (nawet nie ma tu referencji), to zdanie jest więc kompletnie jakościowe i kompletnie nieweryfikowalne. Proszę udowodnić to bardziej formalnie.

**Strona 124:**

Inicjalny → Wstępny

*„Podczas prowadzonych prac stwierdzono, że uwzględnienie poprawki na tłumienie ośrodka geologicznego ma istotny wpływ na wielkość wyznaczanych magnitud, zarówno w kontekście bezpieczeństwa, jak i planowania przyszłych prac z zakresu monitoringu mikrosejsmicznego.”*

Prosiłbym o rozwinięcie tego zdania? Jaki wpływ ma zjawisko o magnitudzie -1.0 i ewentualnie zwiększenie tej magnitudy (w związku z uwzględnieniem tłumienia) na „bezpieczeństwo prac” i „planowanie przyszłych prac”.

**Strona 125:**

*„SRV jest zasadniczą wartością jaką uzyskuje się w wyniku badań mikrosejsmicznych i może być wykorzystana do oceny efektywności procesu szczelinowania hydraulicznego, rozumianej jako wielkość wygenerowanej sieci spękań. Analizując uzyskane wyniki można uznać obliczoną objętość za produktywną”*

OK. Autor podaje wartość i na tym „analiza” się zasadniczo kończy. Brak jakiegokolwiek interpretacji tej wartości. Ba! Brak nawet porównania do wartości uzyskanych przez innych autorów podobnych prac.

## Załącznik B - Referencje:

- Boese, C. M., Kwiatek, G., Fischer, T., Plenkers, K., Starke, J., Blümle, F., Janssen, C., & Dresen, G. (2022). Seismic monitoring of the STIMTEC hydraulic stimulation experiment in anisotropic metamorphic gneiss. *Solid Earth*, 13(2), 323–346. <https://doi.org/10.5194/se-13-323-2022>
- Goodfellow, S. D., Nasser, M. H. B., Maxwell, S. C., & Young, R. P. (2015). Hydraulic fracture energy budget: Insights from the laboratory. *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3179–3187. <https://doi.org/10.1002/2015GL063093>
- Kwiatek, G., Plenkers, K., & Dresen, G. (2011). Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 2592–2608. <https://doi.org/10.1785/0120110094>
- Kwiatek, G., & Ben-Zion, Y. (2016). Theoretical limits on detection and analysis of small earthquakes. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 121. <https://doi.org/10.1002/2016JB012908>
- McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1008–1019. <https://doi.org/10.1002/2013JB010597>
- Shapiro, S. A., Krüger, O. S., Dinske, C., & Langenbruch, C. (2011). Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid-stimulated rock volumes. *Geophysics*, 76(6), WC55–WC63. <https://doi.org/10.1190/geo2010-0349.1>
- Shapiro, S. A. (2015). *Fluid-Induced Seismicity*. Cambridge University Press; Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139051132>
- Waldhauser, F., & Ellsworth, W. L. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- Woessner, J., & Wiemer, S. (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2), 684–698.
- van der Elst, N. J., Page, M. T., Weiser, D. A., Goebel, T. H. W., & Hosseini, S. M. (2016). Induced earthquake magnitudes are as large as (statistically) expected. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6), 4575–4590. <https://doi.org/10.1002/2016JB012818>
- van der Elst, N. J. (2021). B-Positive: A Robust Estimator of Aftershock Magnitude Distribution in Transiently Incomplete Catalogs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(2), e2020JB021027. <https://doi.org/10.1029/2020JB021027>