

Warszawa, 6.06.2017

Recenzja rozprawy doktorskiej Mgr Małgorzaty Słoty-Valim

pt. „GEOMECHANICZNY MODEL OŚRODKA GEOLOGICZNEGO JAKO NARZĘDZIE POSZUKIWAŃ, UDOSTĘPNIANIA I EKSPLOATACJI ZŁOŻ NIEKONWENCJONALNYCH”

1. Podstawy formalne wykonanej recenzji

Niniejsza recenzja wykonana została na podstawie pisma Dziekana WGGiOŚ AGH, prof. dr hab. inż. Jacka Matyszkiewicza z dn. 7 kwietnia 2017 r., zawiadamiającego o powołaniu mnie przez Radę Naukową WGGiOŚ AGH na recenzenta przedmiotowej rozprawy.

2. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa, zatytułowana „GEOMECHANICZNY MODEL OŚRODKA GEOLOGICZNEGO JAKO NARZĘDZIE POSZUKIWAŃ, UDOSTĘPNIANIA I EKSPLOATACJI ZŁOŻ NIEKONWENCJONALNYCH” została przygotowana w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Haliny Jędrzejowskiej – Tyczkowskiej. Praca liczy 215 stron, w tym 9 stron bibliografii. Składa się z pięciu rozdziałów, z których rozdz. I to wprowadzenie, rozdz. II to rys historyczny dotyczący zastosowań geomechaniki, rozdz. III opisuje podstawy teoretyczne mechaniki skał, rozdz. IV zawiera zasadnicze wyniki pracy, a rozdz. V zawiera dyskusję i podsumowanie.

Rozdział IV zatytułowany „Zastosowanie zagadnień geomechanicznych w przemyśle naftowym przy charakterystyce, projektowaniu, udostępnianiu i zarządzaniu złożami o charakterze niekonwencjonalnym”, zawierający zasadnicze wyniki pracy, podzielony został na następujące 4 podrozdziały:

IV.1. Optymalizacja wtórnego zabiegu szczelinowania hydraulicznego na podstawie zmian pola naprężeń wywołanych eksploatacją węglowodorów (model syntetyczny realizowany podczas stypendium w CSM USA)

IV.2. Charakterystyka pola naprężeń w celu zaprojektowania zabiegu szczelinowania hydraulicznego w formacji środkowokambryjskich piaskowców typu „tight” w Basenie Bałtyckim – przykład morski (obiekt B8)

IV.3. Model geomechaniczny dolnopaleozoicznych formacji łupkowych opracowany na podstawie przesłanek wynikających z interpretacji sejsmiki 3D (Basen Bałtycki, przykład lądowy)

IV.4. Zastosowanie modelowania geomechanicznego przy projektowaniu zabiegów stymulacji stosowanych przy drenażu metanu z karbońskich pokładów węgla kamiennego (przykład lądowy, Górnośląskie Zagłębie Węglowe, obiekt Kopalnia Węgla Kamiennego J.S.W. S.A. Zofiówka)

W mojej opinii, rozdział ten powinien zostać podzielony na osobne rozdziały. Każda z jego części stanowi bowiem samodzielną całość. Mam także drobne zastrzeżenie odnośnie samego tytułu pracy. Model geomechaniczny nie jest wykorzystywany w poszukiwaniach *sensu stricte*, a do

jego konstrukcji korzysta się z wyników prac poszukiwawczych. Stąd słowo „poszukiwać” w tytule rozprawy należałoby pominąć.

Generalnie praca napisana jest poprawną polszczyzną, jednak pojawiają się sformułowania typowe dla żargonu technicznego lub typowe dla języka potocznego. Czasem znaczenie zdań jest mało precyzyjne. Przykład ze str. 91: *„Najistotniejszym elementem modelowania przestrzennych rozkładów parametrów petrofizycznych jest przeprowadzenie odpowiedniej analizy danych wejściowych i określenie parametrów procesów obliczeniowych, a więc zdefiniowanie sposobu interpolacji przez algorytmy obliczeniowe danych wejściowych, w ramach przestrzennej siatki interpolacyjnej”*. Razi także stosowanie pojęcia „obiekt złożowy”, powinno być zastąpione przez „złoże”. Pojęcie „obiekt złożowy” pojawia się wyłącznie w polskojęzycznych publikacjach autorki. Rzuca się także w oczy stosowanie różnych jednostek miar, w tym także spoza układu SI: mamy stopy zamiast metrów, psi lub bary zamiast Pa.

Mam liczne zastrzeżenia dotyczące graficznego opracowania rysunków. Wykorzystana w pracy grafika to niestety często „zrzuty z ekranu” – ich jakość jest słaba, niewidoczne są skale barwne lub opisy osi. Niektóre rysunki sprawiają wrażenie, że zostały pokazane, bo są „ładne”, a nie po to, by wnieść istotną informację. Część informacji lepiej zilustrowałoby wykresy 1D, np. pokazujące dane otworowe, dane z sejsmiki i ich *up-scaling* do siatki obliczeniowej. Część rysunków dotycząca różnych realizacji parametryzacji modelu jest w różnej skali (także innej paletce barw) i perspektywie, co uniemożliwia ich porównanie 1:1. W pracy zabrakło także spisu rysunków.

Ze względu na liczbę uwag merytorycznych i obszerność recenzji, pominię dalsze uwagi o charakterze redakcyjnym. W przypadku jednak wydania doktoratu drukiem, sugeruję dokładne sprawdzenie pracy pod kątem uchybień w redakcji tekstu.

3. Uwagi merytoryczne

We „Wprowadzeniu” doktorantka formułuje następujące tezy pracy:

1. Wykorzystanie parametrów opisujących właściwości mechaniczne skały jest podstawowym warunkiem sukcesu poszukiwań, udostępniania i eksploatacji złóż typu niekonwencjonalnego, a szczególnie złóż gazu w formacjach łupkowych.
2. Powszechnie obserwowana w formacjach łupkowych anizotropia właściwości fizycznych sugeruje rozpoznanie przestrzennych rozkładów parametrów geomechanicznych dla przedstawienia efektywnego projektu badawczo-eksploatacyjnego.
3. Geomechaniczny model ośrodka geologicznego stanowi podstawowe narzędzie wyboru i projektowania poziomów i kierunków szczelinowania i udostępnienia formacji gazonośnej.
4. Modele stworzone na podstawie informacji z istniejących banków danych geomechanicznych wymagają konfrontacji poprzez interdyscyplinarne analizy dostępnych materiałów geofizycznych i geologicznych.
5. Model numeryczny o elastycznie dekladowanych parametrach i możliwościach ich modyfikacji, umożliwi teoretyczne i praktyczne studium zjawisk i procesów zachodzących w obiektach złożowych, w tym również typu niekonwencjonalnego.
6. Wyniki uzyskane na modelach numerycznych stanowią istotne wsparcie w opracowaniu strategii poszukiwań złóż niekonwencjonalnych w Polsce.

Pkt. 1, 3 i 4 są dość trywialne. W pkt. 2 nie jest jasny związek anizotropii z rozkładami przestrzennymi (zresztą zjawisko anizotropii będzie dalej w zasadzie zaniedbane). Pkt. 5 sformułowany jest niezręcznie, a przesłanie jest również trywialne. Pkt. 6 nie powinien traktować o poszukiwaniach, a przede wszystkim a o udostępnianiu i eksploatacji złóż.

Cele pracy zostają zaś zdefiniowane następująco:

„Celem pracy jest ocena potencjału badawczego, który niesie wykorzystanie geomechanicznych modeli w tym w opcji FEM (elementów skończonych) na różnych etapach pracy z niekonwencjonalnym obiektem złożowym, a więc na etapie rozpoznania, opracowania projektów wiercenia i udostępniania formacji złożowej czy podejmowania świadomych decyzji w późniejszych etapach zagospodarowania złoża węglowodorów i jego eksploatacji.”

oraz:

„Celem pośrednim było opracowanie uniwersalnego schematu procedur (workflow) prowadzących do konstrukcji modeli geomechanicznych i pozwalających na przeprowadzenie analizy geomechanicznej danego obiektu, bez względu na jego lokalizację czy geometrię, przy zachowaniu możliwie najwyższego poziomu szczegółowości, uwarunkowanego kompletnością zbioru danych wejściowych.”

Ocenę realizacji tych celów pozostawię na koniec recenzji. Dziwi jednak, że celem pracy nie było rozwiązanie żadnego konkretnego problemu złożowego, opisanego w rozdz. IV.

Rozdz. III, dotyczący podstaw teoretycznych geomechaniki, jest zasadniczo poprawny, choć brakuje w nim odwołań do podstawowej literatury przedmiotu. Z rzeczy istotniejszych wspomnieć należy poniższe mankamenty:

Na s. 30 Brakuje niezbędnego dopisku, że równania 3.5-3.8 stosuje się dla skał IZOTROPOWYCH!!! Brak również informacji o relacji modułów dynamicznych i statycznych.

We wzorze 3.13, „g” powinno być w całości; to nie jest „stała przyspieszenia ziemskiego” tylko „przyciąganie ziemskie”

Na s. 38 autorka stwierdza, że: *„W przeciwieństwie do naprężenia pionowego, wartości naprężenia poziomego minimalnego σ_h (ang. minimum horizontal stress) i maksymalnego σ_H (ang. maximum horizontal stress), nie można określić wprost na podstawie znanych relacji opisanych w postaci wzorów”* oraz dalej na s. 39: *„Znacznie trudniejsze jest oszacowanie wartości i kierunku maksymalnego naprężenia poziomego (σ_H). Obecnie nie ma jeszcze dostępnej komercyjnie techniki pomiarowej maksymalnego naprężenia poziomego (σ_H)”*. Istnieją wszakże wzory, podane np. w pracy Jarosińskiego (2005, Prz. Geolog.) wynikające z tzw. równania Kirscha (Hubert & Willis, 1957), łączące σ_{hmin} i σ_{hmax} wokół odwiertu, dzięki którym można szacować wartość σ_{hmax} . Sayers (2010, rozdz. 5) podaje także metodę wyznaczania σ_{hmax} mając do dyspozycji σ_{hmin} oraz zapisy sondy dipolowej.

Brakuje tu także informacji związanych z analizą sondy dipolowej: na jakiej podstawie teoretycznej autorka utożsamia anizotropię azymutalną prędkości sejsmicznych z anizotropią naprężeń (wykorzystane w rozdz. IV.2 i IV.3). W rozdziale nie ma również informacji związanych z wykorzystaniem metod sejsmicznych do szacowania rozkładu anizotropii azymutalnej, a więc pośrednio rozkładu szczelin i kierunków naprężeń (wykorzystane w rozdz. IV.2).

Równanie 3.14 to zapis wg Terzagiego, że stała Biota równą 1, a nie wzór ogólny Nur & Byerlee (1971). W dalszych rozważaniach pojawia się stała Biota, a nie zostaje zdefiniowana, ani nie zostaje omówiony jej sens fizyczny.

W rozdz. IV.1 przedstawione zostają wyniki modelowań syntetycznych, uzyskane podczas stypendium w Colorado School of Mines. Z opisu teoretycznego, jak i samego tytułu rozdziału („Optymalizacja wtórnego zabiegu szczelinowania...”) wynika, że symulowana była taka właśnie operacja i analizowano reorientację naprężeń wywołaną wtórnym

szczelinowaniem. Jednak z opisu przebiegu modelowania wynika, że symulowano sytuację, w której w złożu występuje pojedyncza szczelina, a następnie ze złoża następuje produkcja z pojedynczego, pionowego otworu. Stan naprężeń zmienia się więc pod wpływem produkcji, a nie zabiegu wtórnego szczelinowania. W rozdziale pojawia się także założenie normalnego stanu naprężeń: „Założone parametry modelu odzwierciedlają najpowszechniej występujący w przyrodzie normalny reżim naprężeń tektonicznych, tj. taki, w którym ciśnienie litostatyczne dominuje” – nie wiem skąd doktorantka zaczerpnęła ten pogląd? Pokutuje on w całej pracy (por. dyskusje końcowe).

Kolejne założenie, dotyczące izotropowego stanu naprężeń poziomych, jest także dość życzeniowe, ponieważ trudno znaleźć takie baseny sedymentacyjne, gdzie jest ono spełnione (choć zdarzają się – np. w formacji Bakken, ale to raczej wyjątek niż reguła). Ponieważ założenie to będzie się przewijało w recenzowanej pracy, pozwolę sobie w tym miejscu zacytować M. Jarosińskiego z ogólnodostępnej pracy z Przeglądu Geologicznego z roku 2005: „Na podstawie analizy struktur zniszczeniowych ścian otworów wiertniczych, zwanych *breakouts*, można jedynie stwierdzić, że anizotropia naprężeń poziomych jest zjawiskiem powszechnym w obrębie pokrywy osadowej skorupy ziemskiej, prawie w całym kraju”.

Wnioski z tego rozdziału są, zdaniem doktorantki, następujące:

[1] *Koncepcja i procedury geomechanicznego modelu Ziemi, będące efektem integracji danych geofizyki otworowej i danych inżynierii złożowej, umożliwiają śledzenie zmian i wizualizację stanu naprężeń.*

[2] *Ciśnienie złożowe, obniżające się (ciśnienie porowe) w wyniku postępującej produkcji węglowodorów, jest bezpośrednią przyczyną zmiany w stanie naprężeń panujących w górotworze co powoduje sukcesywne pomniejszanie wartości całkowitego naprężenia horyzontalnego w miarę produkcji węglowodorów*

[3] *Spośród rozpatrywanych wariantów początkowych relacji wartości naprężeń poziomych ($\sigma_H / \sigma_h = 1.01; 1.07$ i 1.15) poddanych symulacji zabieg szczelinowania wtórnego przyniósł najlepsze efekty przy warunkach zbliżonych do izotropowych ($\sigma_H / \sigma_h = 1.01$)*

[4] *Ponadto w warunkach izotropowych zaobserwowano rotację kierunku osi wyznaczonej przez σ_H*

[5] *Równocześnie określono optymalny czas zabiegu szczelinowania wtórnego (rok 2019 – po 6 latach eksploatacji)*

Wnioski 1, 2 są trywialne. Założenie izotropii naprężeń – jak wspomniałem powyżej - jest to sytuacja w przyrodzie zachodząca niezwykle rzadko. Nie przetestowano wpływu pozostałych parametrów na czas zachowania się istotnej zmian naprężeń po rozpoczęciu produkcji. Czy czas ten był jedynie pochodną stosunku Sh_{max}/Sh_{min} ?

Rozdz. IV.2 dotyczy konstrukcji jednowymiarowego (1D) modelu geomechanicznego dla złoża kambryjskich piaskowców typu „tight” położonego na Bałtyku. Rozdział rozpoczyna się od wstępu tektoniczno-geologicznego, który zawiera szereg niepoprawnych i pochopnych sformułowań, np.: „Z kolei występujący w południowej części Basenu Bałtyckiego szereg uskoków przesuwczych o kierunku E-W został założony w związku z silnym wynoszeniem się litosfery” – jaki jest związek ruchów przesuwczych i wynoszenia litosfery?

Kluczowy jednak dla wyników i wniosków tego rozdziału jest błąd, który popełnia doktorantka, odczytując wyniki zabiegów mini-szczelinowania. Wartości $P_c = Sh_{min}$ zestawione w Tab. 4.2.1 (swoją drogą w bar a nie w MPa!) pokazują, że dla dwóch otworów ciśnienia te są 5 razy mniejsze niż dla pozostałych trzech. Prawdopodobnie dotyczą wielkości odczytanej z głowicy otworu – dodając ciśnienie hydrostatyczne otrzymamy wartości zbliżone do pozostałych! Pokazuje to, że należy ostrożnie traktować wyniki pokazane w raportach przez różne firmy

serwisowe. Błąd ten prowadzi do stwierdzenia, że: „ $6h$ przyjmuje zbliżone do siebie wartości w zakresie 0.091-0.098 $6v$ ”, co jest fizycznie niemożliwe.

Doktorantka wykorzystuje sondę dipolową do oceny anizotropii naprężeń: „Wartość maksymalnego naprężenia poziomego została wyznaczona na podstawie obliczonej w otworze WX-6K anizotropii prędkości akustycznej szybkiej i wolnej fali poprzecznej” oraz „Obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że anizotropia zarejestrowanej w otworze fali poprzecznej jest spowodowana naprężeniami działającymi na formację skalną.”. Jak wspomniałem powyżej, w części teoretycznej brak podstaw do takiego wykorzystania wyników sondy dipolowej. Ponadto, anizotropia azymutalna może też wynikać ze zmian strukturalnych (może to być anizotropia pozorną). W kontekście dalszych rozważań dot. kierunku Shmax, ciekawe jaki jest kierunek fali szybkiej z ww. analizy?

W dalszej części rozdziału, autorka sięga po dane sejsmiczne, celem wyznaczenia możliwego kierunku Shmax, stwierdzając że nie dysponuje wynikami analizy breakoutów. Zastanawiający jest fakt, dlaczego autorka nie sięgnęła po wyniki analizy breakoutów dla sąsiedniego otworu (B7), opublikowanych przez M. Jarosińskiego (2005, Tectonophysics), które wskazują na dobrze zdefiniowany kierunek Shmax = 165 stopni.

“Opis szczelin na podstawie danych sejsmicznych pozwala na ocenę ilościową oraz określenie orientacji dużo większej populacji szczelin, przez co możliwe jest wyznaczenie ogólnego trendu ich orientacji, który z kolei może przekładać się na definicję oddziałującego na ośrodek skalny systemu paleonaprężeń lub naprężeń aktualnych, o ile nie uległy zmianie od momentu powstania opisywanych szczelin” – w kontekście wieloetapowych deformacji, nie należy się spodziewać, że dane sejsmiczne pokażą nam współczesny kierunek naprężeń! Z jednej strony autorka ma świadomość, że aktualny stan naprężeń jest różny od paleonaprężeń, z drugiej zaś – nie mam takiej pewności, czy rozumie który z tych kierunków powinien być uwzględniony jako warunek brzegowy modelowania. Dalej ponadto, zdaje się zakładać, że sejsmika pokazuje jednak kierunek współczesny.

„Jednym, ale nie jedynym podejściem w rozwiązaniu powyższego zadania jest między innymi dostępna na platformie Petrel (Schlumberger) procedura wykrywania nieciągłości oparta na tzw. algorytmie mrówkowym.” – w części teoretycznej wypadało choć wspomnieć o innych metodach wykrywania szczelin na podstawie danych sejsmicznych (AVAZ, VVAz, shear wave splitting). Przy braku opisu samych danych sejsmicznych i ich przetwarzania, trudno ocenić wiarygodność uzyskanych wyników (czy przypadkiem zdjęcie sejsmiczne nie było zorientowane N-S? Na wynik mógł wpłynąć tzw. acquisition footprint. Jak wyglądają mapy atrybutu maksymalnej i minimalnej krzywizny w porównaniu z wynikami algorytmu mrówkowego? Jak wygląda atrybut Variance, z definicji wykrywający nieciągłości?).

„... dokonano interpretacji nieciągłości w całym wolumenie prędkości sejsmicznych, przy zadanym zakresie azymutów. Zakres ten wskazano na podstawie opisanych w literaturze kierunków naprężeń w skali regionalnej dla Europy NE, które przyjmują trend N-S, NW-SE (Jarosiński et al., 2006).” – do sterowania algorytmem założono kierunki współczesnych naprężeń, podczas gdy sejsmika daje informacje o paleonaprężeniach, co wynika pośrednio z kolejnego stwierdzenia: „Na rysunku 4.2.10 A, B i C bardzo wyraźnie widać zbliżony do południkowego trend przebiegu szczelin w przewodzie o pionowym charakterze. Występowanie tego typu szczelin w stwierdzonym reżimie ekstensyjnym jest bardzo typowe.” – to raczej wskazuje na trend strukturalny z tej cz. Bałtyku zgodny z uskokami o przebiegu N-S, niż współczesny Shmax.

Wnioski z rozdz. IV.2 sformułowane zostały następująco:

[1] We wszystkich otworach, w pełnym ich profilu zostaje zachowana następująca relacja między podstawowymi naprężeniami oddziałującymi na ośrodek skalny: $6v > 6H > 6h$, tym samym we

wszystkich analizowanych otworach wiertniczych stwierdza się normalny (ekstensyjny) reżim naprężeń wg. definicji reżimów tektonicznych Andersona

[2] Stwierdzony na obiekcie złożowym B8 ekstensyjny reżim naprężeń wpływa na poprawę przepuszczalności

[3] Na podstawie danych z pięciu otworów wiertniczych wyróżnić można trzy strefy, w obrębie których panują naprężenia o porównywalnych wartościach. Prawdopodobną przyczyną tego zróżnicowania jest bariera geologiczna izolująca obszar przewiercony otworami WX-2BIS i WX-3 z obszarem przewierconym otworem WX-4 oraz z obszarem przewierconym otworami WX-5BIS i WX-6K

[4] Najbardziej sprzyjającymi warunkami do szczelinowania, a później do iniekcji płynów do ośrodka skalnego celem intensyfikacji eksploatacji charakteryzuje się obszar przewiercony otworami wiertniczymi WX-2BIS i WX-3. Warunki te ulegają pogorszeniu kierując się w kierunku północnym w otworze WX-4, a najgorsze zostały stwierdzone w otworach WX-5BIS i WX-6K

[5] Zbliżony do południowego trend przebiegu szczelin w przewodzie o pionowym charakterze uznany został za kierunek maksymalnego naprężenia poziomego, co jest zgodne z literaturowymi doniesieniami na temat pola naprężeń w tej części Europy

[6] Kierunek powstających na skutek zatłaczania wody do górotworu szczelin będzie zgodny ze stwierdzonym kierunkiem maksymalnego naprężenia poziomego tj. N-S i NW-SE

Wniosek 1 to pochodna założenia niewielkiej anizotropii naprężeń na podstawie wyników sondy dipolowej. Przy Sv ok. 60 MPa i Shmin ok. 30 MPa, korzystając ze wzoru [1] z pracy Jarosińskiego (2005, Prz. Geolog.), zakładając Pp = Phydrostat. wydaje się, że jesteśmy bliscy granicy gdzie Shmax > Sv. Wniosek 2 jest zatem nieuprawniony. Wniosek 3 – postulat bariery wynika z błędu w założeniach. Błędny jest także Wniosek 4. Wniosek 5 i 6 – pomieszano tutaj kierunki współczesnego Shmax z paleonaprężeniami.

Rozdz. IV.3 dotyczy konstrukcji modelu geomechanicznego dla dolnopaleozoicznej formacji łupkowej na Pomorzu. Rozdział jest dwudzielny: rozpoczyna się od konstrukcji geomechanicznego modelu 3D, a kończy modelem 1D dla otworu L-1. Objętościowo stanowi zasadniczą część rozdziału „wynikowego”. Rozdział rozpoczyna się wstępem geologiczno-tektonicznym, gdzie podobnie jak w przypadku rozdz. IV.2 pojawiają się pewne nieścisłości, lub braki, m.in. w modelu geomechanicznym autorka wydziela horyzonty perspektywiczne nazwane Source0-Source4, ale nigdzie nie są one opisane pod względem np. litologii, miąższości, parametrów petrofizycznych, zawartości TOC, etc.

Opis konstrukcji modelu 3D ma pewne braki, trudno jest prześledzić cały „workflow”. Nie wiadomo np. czy uskoki były składową modelu? Jeśli tak, to skąd pochodziła ich interpretacja? Nie wiadomo także, jaki jest minimalny zestaw parametrów, który umożliwi wykonanie obliczeń. Dopiero w połowie rozdz. pojawiają się w końcu informacje, jakie jeszcze składniki potrzebne są do budowy MEM i modelowania FEM. Pojawiają się w kontekście opisu skał nadkładu, natomiast nic nie było powiedziane na ich temat dla horyzontów Source0-4. Zdecydowanie powinno to być zdefiniowane wcześniej – może opisując geometrię modelu – model sparametryzowany jest tak, że w każdym „oczku” siatki mamy następujące parametry: porowatość, moduły E, K i G + Poisson, UCS, T (wytrzymałość na rozciąganie)?, współczynnik tarcia?, stała Biota?, co jeszcze?

W opisie dotyczącym geometrii modelu brakuje ważnych elementów. Co dyktowało rozmiar pionowej siatki modelu? Rozmiar min. siatki to 23,5 m, co w zasadzie obejmuje miąższość niektórych interwałów perspektywicznych. Co z kolei wpłynęło na poziomą siatkę: 100 x 100 m – czy np. zwiększenie jej do 200-250 m w poziomie przy jednoczesnym zagęszczeniu w pionie nie byłoby numerycznie tożsame (zachowanie ~ podobnej liczby komórek w modelu), lub gdyby pozostawić rozmiary pionowe, umożliwiłoby to szybszą realizację obliczeń?

Wykorzystanie atrybutów sejsmicznych, szczególnie „metatrybutu” jest niejasne. Jakie atrybuty składają się na ten „metaatrybut”? Należałoby pokazać wykresy krzyżowe dla zależności atrybutów sejsmicznych składających się na ten „metaatrybut” i porowatości liczonych w miejscach otworów.

Opis odnoszący się do konstrukcji modelu gęstości jest bardzo „inżynierski” i trudno z niego wywnioskować, co faktycznie zostało w tym procesie zrobione i jak tak naprawdę odbyła się integracja danych otworowych i wyników inwersji sejsmicznej. Cytując in extenso:

„W celu oszacowania gęstości w procesie estymowania lub symulowania przestrzennego rozkładu parametru gęstości objętościowej ośrodka skalnego zastosowano zarówno dane otworowe jak i sejsmiczne. Możliwość taką stwarzają algorytmy bazujące na równaniu co-krigingu: w postaci algorytmów estymacyjnych (deterministycznych) lub też symulacyjnych (stochastycznych); w niniejszej pracy wykorzystano obydwie możliwości (...) W ramach analizy geostatystycznej poprzedzającej interpolację przestrzenną zdefiniowano zakresy zmienności gęstości objętościowej paleozoicznej formacji łupkowej w oparciu o dane z pomiarów profilowania otworowego, jak również określono kierunek i parametry anizotropii zmienności gęstości. W tym przypadku wykorzystywano zarówno dane otworowe (dla określenia teoretycznego modelu wariogramu oraz zasięgu strefy oddziaływania semiwariogramu w kierunku pionowym), jak też wyniki przekształceń danych sejsmicznych (dla określenia kierunku i zasięgu strefy oddziaływania semiwariogramu dla kierunków horyzontalnych). Powyższe etapy analizy geostatystycznej definiują sposób realizacji interpolacji przestrzennej, a tym samym w sposób znaczący wpływają na ostateczny wynik modelowania rozkładów przestrzennych poszczególnych parametrów, w tym przypadku gęstości objętościowej.”

Opis ten dotyczy generalnie konstrukcji całego modelu wolumetrycznego, nie tylko modelu gęstości, jednak jest zbyt ogólnikowy. Czytelnik jest potencjalnie zainteresowany jak autorka pracy poradziła sobie z tym zadaniem, w przypadku małej ilości danych otworowych i niewielkiej rozdzielczości sejsmiki w stosunku do miąższości warstw. Jak to się także ma do rozmiaru siatki modelu?

Doktorantka pomija jednak inny ważny element, jakim jest konwersja czasowo-głębokościowa danych wejściowych (wolumeny wynikowe z inwersji sejsmicznej są w domenie czasu). W jaki sposób budowano model w tym wypadku: czy mapowano najpierw wyniki inwersji w domenie czasu na siatkę modelu geomechanicznego (up-scaling) w domenie czasu (jaki rozmiar pionowy takiej siatki w ms?), uśredniając wyniki dla danej komórki modelu, a następnie dokonano konwersji tego modelu do głębokości?

Na s. 103 mamy dość kuriozalne stwierdzenie: *„W rozkładach przestrzennych modułów sprężystości takich jak współczynnik Poissona, moduł Younga i modułu sprężystości objętościowa, wyraźnie zaznacza się pas przebiegający z NE na SW o wyższej sztywności i jednocześnie wyższej plastyczności i oporności na deformacje objętości, co jest odzwierciedleniem relacji krzywych geofizyki wiertniczej”* – jakie jest fizyczne uzasadnienie tego typu zachowania? Jak skała może być jednocześnie o wyższej sztywności i wyższej plastyczności? Dane otworowe nie wskazują takich relacji! W przypadku np. modułu Younga i stałej Poissona, należało wykonać wykres krzyżowy, który pokazał by ew. trendy związane z obszarami o większej kruchości (*brittleness*). Wnioski wysnute tu są zbyt pochopne: bliższa analiza map dla np. horyzontu Source 2 pokazuje, że najwyższe wartości współczynnika Poissona są stowarzyszone z relatywnie niskimi wartościami modułu Younga. Na s. 105 czytamy z kolei: *„Na podstawie przestrzennego rozkładu parametrów sprężystych, które decydują o podatności ośrodka poddawanego zabiegowi szczelinowania stwierdzono, że najlepsze warunki do przeprowadzania szczelinowania hydraulicznego panują w SE części analizowanego obszaru”*. Autorka powinna być ostrożniejsza w formułowaniu wniosków: w części SE zbliżamy się do krawędzi zdjęcia sejsmicznego oraz mamy dużą strefę uskokową!

Fundamentalnym problemem w przypadku porównania modułów dynamicznych z otworów oraz z pomiarów na próbkach jest zaniedbanie przez autorkę zjawiska anizotropii typu VTI (zwaney także anizotropią polarną lub radialną, o pionowej osi symetrii), które cechuje skały łupkowe i zostało także stwierdzone na Pomorzu.

W takiej sytuacji, prędkości fal P i S pomierzone w otworze, stanowią tzw. prędkości pionowe V_{p0} , V_{s0} w parametryzacji Thomsena dla ośrodka VTI (Thomsen, 1986, Thomsen, 2014) i określają tylko 2 spośród 5 niezależnych składowych tensora sprężystości (C_{33} , C_{44}). Moduł Younga wyliczony wprost z danych otworowych (V_p , V_s , gęstość), stosując równania dla ośrodka izotropowego [równ. 3.6 z rozdz. III], w tym wypadku jest modułem pozornym. Moduł pozorny nie jest tożsamy z pionowym modułem Younga (E_{33}) ani z modułem poziomym (E_{11}), opisującym ośrodek VTI w ujęciu geomechaniki. Ursin i Thomsen (2010) pokazali, że w przypadku słabej anizotropii, pozorny moduł Younga jest liniową kombinacją wszystkich 3 parametrów anizotropii Thomsena (δ , ϵ , γ). W laboratorium z kolei, podczas testów trójosiowych, wyznacza się wartości poziomego i pionowego modułu Younga oraz poziomej i pionowej stałej Poissona. Zdecydowana jednak większość pomiarów laboratoryjnych dotyczy poziomego modułu Younga, tzn. mierzonego równoległe do laminacji skały. W związku z powyższym, w ośrodku VTI, nie można porównywać wartości modułów pozornych, wyznaczonych ze wzorów izotropowych (np. modułu Younga) ze statycznymi wartościami, otrzymanymi w laboratorium. Wydaje się, że w tym przypadku, autorka dysponując kompletem danych otworowych oraz danymi laboratoryjnymi powinna zacząć od:

- wyznaczenia składowych tensora sprężystości dla symetrii typu VTI,
- wyznaczenia pionowych i poziomych dynamicznych stałych materiałowych (moduł Younga, wsp. Poissona) oraz parametrów anizotropii Thomsena,
- wyznaczenia statycznych stałych materiałowych

Związki statystyczne między modułami statycznymi a dynamicznymi omawiane na s. 109-113 są obarczone błędem metodologicznym, o którym wspomniałem powyżej, tzn. faktem, że nie były ze sobą porównywane te same parametry. Współczynniki determinacji są w większości słabe, pokazujące że model liniowej zależności między modułami nie jest odpowiedni. Na 24 analizowane przypadki, tylko 9 pokazuje zadawalające dopasowanie ($R^2 > 0.6$). Osobą kwestią są błędy pomiarów laboratoryjnych, a wykresy ze s. 110-112, wskazują na wartości odstające od pozostałych, jak również reprezentatywność próby (na rys. 4.4.30 korelacja wyznaczana dla 4 punktów! Należy pamiętać, by przy analizie danych laboratoryjnych podawać zawsze liczebność próby np. w tabeli 4.3.1).

Odnosnie uzyskanego rozkładu stałych materiałowych doktorantka stwierdza, że „Uzyskane wyniki uznano za zbyt mało dokładne aby spełniły warunki wymagane dla modelu geomechanicznego koniecznego w prognozowaniu szczelinowania hydraulicznego.” Na czym polega zbyt mała dokładność w tym kontekście? Dla prognozowania zabiegów szczelinowania wystarczyłoby tak naprawdę model jednowymiarowy.

W związku z powyższym, do wyliczenia modułów statycznych autorka sięga także po algorytm sieci neuronowych (ANN). Niestety opis jego aplikacji jest b. niejasny (np. co stanowiło zbiór treningowy, co było wejściem), a wyniki nie są szeroko przedyskutowane – w szczególności nie ma porównania 1:1 z wynikami przeliczeń za pomocą zależności korelacyjnych. Czy do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie (UCS) trzeba było stosować ANN? Nie można było przyjąć za Plumbem (1994) relacji liniowej: $UCS = a \cdot E_{stat}$, tak jak zrobiono w części dot. modelu 1D?

W przypadku szacowania ciśnienia porowego (P_p), warto zauważyć, że na s. 139, równ. 4.3.7 odwołuje się do równ. 3.14, które pomija stałą Biota. Jak uwzględnienie stałej Biota < 1 wpłynęłoby na szacowanie P_p ?

Nie podano także, ile wynoszą stałe A, B i eksponent Eatona wyliczone w tym przypadku? Jak aproksymowano V_{normal} w metodzie Eatona? Szacowanie ciśnienia porowego może być także obarczone błędem ze względu na występującą anizotropię typu VTI. Thomsen (2014) zaleca, aby do predykcji ciśnień w miejscu otworu kalibracyjnego, gdzie pomierzono zarówno P_p , jak i V_p , wykorzystać V_p z sejsmiki (ponieważ w niej zawarta jest także anizotropia, w przeciwieństwie do prędkości z odwiertu \sim prędkości pionowych V_{p0}).

Autorka zauważa taką możliwość: „W przypadku ewentualnego kontynuowania tematyki na obiekcie O-3D wskazane byłoby wykorzystanie danych sejsmicznych jako nośnika informacji o rozkładzie ciśnienia porowego. Wykorzystanie danych sejsmicznych ograniczyłoby niepewność rozkładu w kierunku poziomym i umożliwiłoby stwierdzenie obecności ewentualnych barier dla ciągłości zinterpretowanych w otworach wiertniczych stref o podniesionym ciśnieniu porowym”. Co stało na przeszkodzie, żeby wykorzystać sejsmikę na tym etapie prac?

Niestety interpretację stref anomalnych ciśnień autorka zamyka w jednym stwierdzeniu:

„Występowaniu wszystkich opisanych stref o uformowanym anomalnie wysokim ciśnieniu porowym towarzyszy zwiększenie udziału piaskowców i w przypadku strefy występującej w przyspągowych utworach landoweru (S1a) zwiększenie udziału węglanów. Jest bardzo prawdopodobnym, że do utworzenia się stref o wysokim ciśnieniu doszło właśnie w izolowanych w kierunku pionowym wkładkach piaskowcowych czy marglistych o wyższej przepuszczalności”

Co z innymi czynnikami? Czy strefy te mogą mieć też podwyższone TOC? Czy jakieś inne mechanizmy, opisane w cz. teoretycznej pracy, mogły mieć tu znaczenie? Występowanie nadciśnień w łupkach gazonośnych jest niezwykle rzadkie (może występować w łupkach formacji Haynesville, zob. np. Sondergeld i Rai, 2011). Być może na taką interpretację P_p ma wpływ jakość pomierzonych w tych interwałach danych otworowych?

Dla określenia kierunku Sh_{max} , autorka sięga po interpretację XRMI z otworu L-1, uzyskując azymut biegu 158 stopni (dla jakiej formacji? Średnio?). Wydaje się, że dla tak generalnego modelu 3D, należało wprost przyjąć regionalny kierunek Sh_{max} , określony np. w pracy Jarosińskiego (2005, Tectonophysics) na Pomorzu jako 167 stopni.

Dlaczego autorka nie podaje wprost jaka była wartość Sh_{min} określona podczas zabiegu szczelinowania?

Doktorantka ponownie sięga do wyników interpretacji sondy dipolowej, celem określenia wprost anizotropii naprężeń: „Stwierdzona na podstawie stosunku prędkości szybkiej i wolnej składowej fali poprzecznej (ang. fast i slow shear wave) niska anizotropia prędkości stanowiła podstawę dla określenia anizotropii podstawowych naprężeń poziomych (Fig. 4.3.54).”

Analiza ta prowadzi do założenia, że stosunek Sh_{max}/Sh_{min} wynosi 1.01, co jest mało prawdopodobne: po pierwsze jest raczej niespotykany w innych basenach łupkowych, po drugie regionalny stan naprężeń wskazuje raczej na reżim przesuwczy (por. Jarosiński 2005, 2006). Model wynikowy z symulacji, powinien ten regionalny reżim utrzymać, a tak się nie dzieje, co wskazuje na jego błędne założenia.

Wyniki modelowania pozostawiają szereg wątpliwości, ponieważ pewne elementy nie zostały wcześniej opisane, bądź też przyjęte założenia były nierealistyczne. Autorka opisuje wyniki modelowania FEM, stwierdzając, że: „Dominujące pod względem wielkości naprężenie pionowe ov

implikuje, że analizowana formacja łupkowa znajduje się w normalnym reżimie tektonicznym". Takie jednak było założenie w modelu! Dla uzasadnienia przytacza pracę M. Jarosińskiego: „Reżim ekstensyjny dla tego regionu był już opisywany przez Jarosińskiego i in. (2006). Tego typu reżim tektoniczny powinien sprzyjać powstawaniu szczelin indukowanych hydraulicznie”. Jednak w pracach Jarosińskiego i in. (2006), Jarosińskiego 2005, 2006 w regionie tym pojawia się zawsze reżim typu strike-slip!

Po przedstawieniu modelu 3D, doktorantka wraca do modelowania 1D, przedstawiając analizę stabilności ściany odwiertu na przykładzie otworu L-1. Jest to zaskakująca kolejność, bo od tego powinno zacząć się analizę i dopiero przejść na model 3D. Analiza 1D, mniej skomplikowana obliczeniowo, pozwoliłaby na przetestowanie różnych parametrów i ich wpływu na końcowy wynik. Ta część rozdziału zawiera ponownie nierealistyczne założenie izotropii naprężeń poziomych. Zwraca uwagę brak odniesienia do modelowania 3D w tej części pracy: „Obliczone w ten sposób dynamiczne parametry sprężyste zostały przeliczone do odpowiadających wartości statycznych posługując się punktami kalibracyjnymi w postaci wyników parametrów statycznych pomierzonych przez Zespół z Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego” – jak dokonano tego przeliczenia? Czy stosując zależności liniowe, jak w części dot. modelu 3D? A może algorytm ANN?

Na s. 158 ponownie pojawia się stała Biota = 1 – dlaczego? Pojawiają się w literaturze wzmianki o stałej Biota dla formacji łupkowych < 1, np. dla formacji Bakken wskazano wartości z przedziału 0.15-0.75. Wydaje się, że w przypadku modelu 1D, łatwo można było policzyć kilka jego wariantów, zakładając różne wartości stałej Biota.

Jednak najbardziej zaskakująca jest interpretacja uzyskanych wyników modelowania:

*„Ważną do odnotowania obserwacją jest **pozorna lub rzeczywista (sic!) niezgodność** prognozowanych stref zniszczenia ze stanem faktycznym, zaobserwowanym w ścianie otworu wiertniczego przy wykorzystaniu obrazu ściany odwiertu, pomierzonym w tym interwale przy użyciu sondy mikroopornościowej (XRMI). Przy pomierzonych wartościach minimalnego naprężenia poziomego σ_h należałoby oczekiwać, że przy zastosowanych parametrach wiercenia (gęstość płuczki wiertniczej równa 1.18 g/cm³), zniszczenie w ścianie odwiertu powinno być znacznie większe.”*

Jeżeli model przewiduje wystąpienie zjawiska, w tym wypadku zniszczeń ściany otworu typu breakout, w interwale, w którym fizycznie ich nie obserwujemy, to model należy uznać za sfalsyfikowany (jego założenia są błędne)!

Na str. 162 doktorantka podaje możliwe wyjaśnienia tej niezgodności:

„Przyczyną takiego stanu rzeczy może być najprawdopodobniej nieustalony do tej pory błąd podczas wykonywania zabiegu szczelinowania lub nieprawidłowa interpretacja jego wyników wykonana przez firmę serwisową (...) Albo, co mniej prawdopodobne, niewłaściwe skonfigurowanie, uprzednio skalibrowanych wynikami pomiarów laboratoryjnych parametrów mechanicznych takich jak: moduł Younga E , współczynnik Poissona ν , wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe UCS, czy kąt tarcia wewnętrznego FA . Pomimo faktu, że kalibracji nie podlegała stała Biota α , kąt tarcia wewnętrznego FA i wytrzymałość na rozciąganie T , z uwagi na nie przeprowadzenie pomiarów, brak kalibracji nie powinien przynieść znaczących różnic w uzyskanym obrazie prognozowanych zniszczeń. Co więcej, nieskalibrowane i niepomiernie parametry (wartość kąta tarcia i stałej Biota) założono na poziomie wartości powszechnie przypisywanych w literaturze osadom łupkowym”

Kwestionowanie poprawności wykonania szczelinowania, w kontekście całego szeregu możliwych błędów w parametrach modelu wydaje się nie na miejscu. Błąd pomiarów

laboratoryjnych jest bardzo prawdopodobny – nie został on oszacowany przez wykonawcę badań? Jak wspomniano powyżej – wystarczyło policzyć kilkanaście wariantów modelu 1D, zakładając różny poziom błędu na wyznaczenie stałych materiałowych, stałą Biota, a przede wszystkim Sh_{min} oraz proporcję Sh_{min} do Sh_{max} . Oczywiście na błędną predykcję modelu ma też wpływ zaniedbanie anizotropii typu VTI. Kwestia błędnego wyznaczenia Sh_{min} – czy jego wartość (nie podana w pracy) jest zbliżona do Sh_{min} raportowanego w rozdz. IV.2?

W kontekście wskazanych problemów, tylko część wniosków z rozdz. IV.3 sformułowanych na str. 162-163, jest prawdziwa. Z pewnością nieprawdą jest, że:

„- Uzyskany rozkład naprężeń wskazuje, że analizowany obszar znajduje się w ekstensyjnym reżimie naprężeń; umożliwia również prognozowanie trajektorii odwiertów, a zwłaszcza ich sekcji poziomych

- Przeprowadzona analiza stabilności ściany odwiertu wykazała niezgodność wyników modelu mechanicznego 1D z faktycznym stanem ściany odwiertu zarejestrowanym przez profilowanie mikroopornościowe XRFMI, wskazując wynik pomierzonej wartości minimalnego naprężenia poziomego σ_h za najbardziej wątpliwy”

Pozostałe wnioski są bardzo ogólne lub oczywiste, np. *„Ze względu na dynamiczną naturę pomiarów parametrów sprężystych, wykorzystujących prędkość propagacji fali sejsmicznej, istnieje formalna konieczność pozyskania ich statycznych odpowiedników czyli przeliczenia parametrów dynamicznych na statyczne, wykorzystywanych następnie w procedurach modelowania geomechanicznego,*

W rozdz. IV.4 doktorantka wraca do koncepcji konstrukcji modelu geomechanicznego 3D – tym razem pod kątem symulacji udostępniania złoża przy ekstrakcji metanu z pokładów węgla (technologia CBM) w rejonie Jastrzębia-Zdroju. Zarówno geometria, jak i konstrukcja modelu różni się w stosunku do przedstawionej w rozdz. IV.3, ze względu na skalę obiektu objętego badaniami, jak i dostępność materiału eksperymentalnego. Niestety, różnice te nie zostają wyjaśnione, ani w tym rozdziale, ani w późniejszej dyskusji (rozdz. V). Autorka stwierdza przy tym, że: *„Rozmiar modelu lokalnego wynikał z kompromisu pomiędzy dużą dokładnością modelu a czasochłonnością procedur obliczeniowych”*. Nigdzie w pracy nie pojawia się informacja, jak długo liczą się tego typu modele 3D i na jakim sprzęcie.

„Na podstawie dostarczonej dokumentacji geologicznej, danych geofizyki wiertniczej utworzono zbiór danych punktowych i profile dostarczające informację dotyczącą litologii, gęstości, porowatości, modułu Younga i wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe (UCS). Pozostałe parametry istotne dla modelu geomechanicznego (...) zostały założone na podstawie danych z literatury” – stwierdzenie to wymaga nieco więcej komentarza zarówno ilościowego, jak i jakościowego: np. czy mowa tu o module Younga statycznym? Liczebność prób dla litologii, etc.

W przeciwieństwie do rozdz. IV.3, do tworzenia modelu rozkładu przepuszczalności, gęstości, porowatości wykorzystano algorytm stochastyczny. Dlaczego? Jego zastosowanie wymaga poszerzonego komentarza. Jest to o tyle ciekawe, że model zbudowano w oparciu o 2 otwory. Czy modele te zostały zbudowane przez doktorantkę? Czy w modelowaniu tym wykorzystano model facjalny o którym mowa na s. 171? W przypadku modelu litofacjalnego – czy opis na s. 171 odnosi się do rzeczy wykonanych przez doktorantkę, czy opisuje procedurę zrealizowaną przez K. Sowiżdżała?

„Ze względu na ograniczenia danych, współczynnik Poissona i kąt tarcia wewnętrznego wyznaczono na podstawie danych zaczerpniętych z literatury (Si, G., et al., 2015) i konsultacji z partnerami projektu GasDrain z Royal School of Mines (Imperial College London)” – czy naprawdę

nie ma w polskiej literaturze parametrów geomechanicznych dla skał GZW? Skąd w tab. 4.4.2 tak nierealistycznie niska wartość wsp. Poissona dla piaskowców (0.11)? Podobnie do rozdz. IV.3 - w tab. 4.4.1 powinna być dodana liczba próbek dla których podano średnie wartości.

Ekstrapolacja wartości gradientu P_p z tak odległych rejonów jak Niemcy jest nadużyciem. Co stało na przeszkodzie, żeby metodą Bowersa/Eatona zweryfikować chociaż, czy wartość gradientu jest zbliżona?

I w tym wypadku pojawia się wątpliwe założenie odnośnie normalnego stanu naprężeń, izotropii naprężeń poziomych i ekstrapolacja wartości z odległych rejonów:

*„Założony w symulacji model koresponduje z normalnym reżimem naprężeń. W normalnym stanie naprężeń, który jest **najpowszechniej spotykaną konfiguracją naprężeń podstawowych w ośrodku skalnym**, spośród trzech naprężeń podstawowych naprężenie litostatyczne (σ_v) jest największe (...) Gradient maksymalnego naprężenia poziomego z uwagi na brak danych został określony na podstawie danych literaturowych na poziomie 0.018 MPa/m (Mark and Gadde, 2008), podczas gdy relacja między minimalnym a maksymalnym naprężeniem poziomym została zdefiniowana jako jedność, co oddaje proste warunki z poziomą izotropią.”*

Dla określenia kierunku Sh_{max} , w tym przypadku posłużono się obserwacjami geologicznymi dot. sieci głównych spękań z kopalni Zofiówka i Brzeszcze: „(...) stereodiagramy przedstawiające azymuty biegu głównych sieci spękań w założeniu odzwierciedlające kierunki maksymalnego naprężenia poziomego.” z konkluzją, że „Azymut biegu głównego system spękań przecinających pokłady węgla w kopalni Zofiówka wynosi ok. 20°.” Jeśli by jednak założyć, że obszar znajduje się w reżimie przesuwczym, to sprzężone zespoły spękań ścięciowych tworzą się pod kątem ok. 30 stopni do Sh_{max} . Wówczas otrzymamy kierunek Sh_{max} ok. 170 stopni, co jest zgodne z wynikami analizy breakoutów w pobliskich otworach (169-161 stopni za Jarosiński, 2005, Tectonophysics).

W opisie uzyskanych wyników symulacji geomechanicznej mamy oczywiste stwierdzenie: „Na obszarze kopalni zgodnie z założeniami warunków brzegowych obserwuje się ekstensyjny reżim naprężeń”. Dalszy opis dotyczący rotacji Sh_{max} i tak nie jest użyteczny, ze względu na potencjalnie błędnie założony pierwotny kierunek Sh_{max} .

„Na obszarze modelowanego pokładu węgla 412 obserwuje się koncentrację naprężeń w strefach sąsiadujących z chodnikami górniczymi, w strefie przyotworowej oraz na obszarze poddanym zabiegom stymulacji: szczelinowaniu hydraulicznemu i zabiegowi jetslotting” – autorka nie podaje wcześniej nic na temat usytuowania w modelu poziomego odwiertu oraz zabiegów szczelinowania i „jetslottingu” – jakie były ich parametry? Ciśnienia, etc.? Dopiero na s.190 czytamy, że: *„W modelu założono poziomy otwór stymulacyjny o długości 100 m i średnicy 15 cm odwiercony z chodnika górniczego w kierunku zgodnym z minimalnym naprężeniem poziomym. Modelowane trzy pionowe szczeliny hydrauliczne o aperturze 5 mm i długości połowicznej 50 m, przebiegały prostopadle do trajektorii odwiertu i przecinały pokład węgla 412.”* Nie wiemy jednak jakie były symulowane ciśnienia zabiegów?

Na s. 186 czytamy, że *„Ostatecznym celem modelowania numerycznego jest symulacja metod stymulacji pokładu węgla 412 poprawiających zcerpanie gazu przy użyciu szczelinowania hydraulicznego i zabiegu jetslotting. Ocena efektywności poszczególnych metod stymulacji, wykonana przez zespół pod kierownictwem dra Wiesława Szotta, poprzedzona została modelowaniem dynamicznym uwolnienia metanu na drodze omawianych metod stymulacji i jego przepływu z matrycy węgla to strefy stymulacji i następnie do strefy przyotworowej przeprowadzonym przy wykorzystaniu symulatora złożowego Eclipse (Schlumberger).”* – nie jest jasne kto wykonał te modelowania przepływu. Doktorantka?

Wnioski z rozdz. IV.4 sformułowane poniżej wydają się być zbyt ogólne, w części trywialne, a także wynikające z przyjęcia błędnych założeń:

[1] określenie kierunków i wartości naprężeń podstawowych może być realizowane na drodze modelowania geomechanicznego

[2] znajomość rozkładu naprężeń podstawowych, ich kierunku i wartości, pozwala na poprawne zaprojektowanie odwiertów stymulacyjnych w pokładach węgla, a także pozwala na poprawne zaprojektowanie procedury udostępnienia i lokalizacji odwiertów stymulujących

[3] główny kierunek maksymalnego naprężenia poziomego na obszarze odmetanowania węgla wskazuje optymalny kierunek poziomych odwiertów stymulacyjnych, o kierunku prostopadłym do kierunku tego naprężenia tj. NNE-SSW w północnej części i N-S w południowej części obszaru odmetanowania.

[4] Modelowanie efektywności technik stymulacji pokładu węgla (na drodze szczelinowania hydraulicznego i zabiegu jetslotting) wymaga użycia wysokorozdzielczych modeli geomechanicznych w celu poprawnej identyfikacji zmian parametrów geomechanicznych (naprężenie i odkształcenie)

[5] Zmiana właściwości geomechanicznych implikuje zmiany właściwości transportowych płynów złożowych i zabiegowych co w efekcie pozwala na symulację hydrodynamiczną w wybranym interwale czasu eksploatacji pokładu

[6] Strefy zniszczenia powstałe na skutek zabiegów stymulacji stanowią główny czynnik wprowadzający poprawę drenażu metanu z pokładu węgla

Rozdz. V (Dyskusja i podsumowanie) nie zawiera niestety rzetelnej dyskusji naukowej uzyskanych wyników i często sprowadza się do omówienia, co zostało wykonane w poszczególnych rozdziałach. Zawiera także szereg bądź to ogólnych, bądź też ad hoc sformułowanych stwierdzeń, które są często nieuprawnione, w kontekście popełnionych błędów metodologicznych – vide przykład ze str. 195:

*„Przedstawiony w rozprawie bogaty przegląd bibliograficzny uzupełniony przykładami rozwiązania zadań praktycznych realizowanych w Polsce, pozwala na przedstawienie **poprawnego** i szeroko rozbudowanego schematu modelowania właściwości mechanicznych ośrodka pomimo stosunkowo słabo jeszcze rozpoznanego w kraju sposobu tworzenia modeli geomechanicznych,*

Na jakiej podstawie doktorantka twierdzi, że schemat modelowania jest poprawny?

Autorka twierdzi także, że: *„Światowa bibliografia poświęcona problematyce MEM jest aktualnie bardzo bogata. Jednocześnie bezpośrednie przenoszenie pewnych rozwiązań i sugestii musi być traktowane z wyważonym dystansem, bowiem, stan geomechaniczny ośrodka skalnego jest zdecydowanie specyficzny i unikalny dla danego basenu sedymentacyjnego, kształtowanego w historii czasu geologicznego”.*

Niestety, takiego „wyważonego dystansu” doktorantka nie zachowała, ekstrapolując parametry ośrodka z odległych rejonów – szczególnie widoczne to jest w Rozdz. IV.4. W podsumowaniu na s. 204 mamy tego przykład: *„Warunki brzegowe dla obiektu Zofiówka określono przy pomocy opublikowanych opracowań porównawczych dotyczących analizy warunków geomechanicznych, w tym ciśnień porowych i naprężeń poziomych, w kopalniach na terenie Europy”.*

Kolejny lapsus, to pojawiające się po raz kolejny stwierdzenie (bez podania źródeł), że *„założony stan naprężeń odpowiada normalnemu reżimowi tektonicznemu, który **jako najczęściej spotykany w przyrodzie (sic!) układ naprężeń, stanowi reprezentatywny przykład badawczy”.***

Wystarczy sięgnąć po prace M. Jarosińskiego dot. obszaru Polski, by przekonać się, że na wielu obszarach kraju dominuje reżim przesuwczy! (globalnie ilustruje to cytowany przez autorkę projekt World Stress Map).

Autorka stwierdza (s. 194), że: *„W okresie realizacji pracy niejednokrotnie dawały się odczuć konsekwencje wynikające ze stosunkowo jeszcze skromnych zasobów polskojęzycznej literatury, najczęściej ograniczonej do opracowań z zakresu geologii inżynierskiej i górnictwa węgla kamiennego”*.

W tym kontekście dziwi bardzo pominięcie szeregu prac M. Jarosińskiego (np. 1998, 2005 Tectonophysics, 2006 Geol. Quart., 2005, Przegląd Geolog.), do których sięgnięcie, pozwoliłoby na przeprowadzenie modelowań z realistycznymi założeniami, lub dostarczyłoby wprost danych do modelu, np. opisując przykład z rozdz. IV.2 doktorantka stwierdza, że: *„Potwierdzenie kierunku aktualnie oddziaływujących naprężeń poziomych wymagałoby analizy obrazu ściany otworów wiertniczych pod kątem interpretacji struktur zniszczenia, powstałych w procesach technologicznych (...) Niestety, według wiedzy autorki, analiza taka nie została zrealizowana przez operatora obiektu.”* Analiza taka została przeprowadzona dla sąsiedniego otworu (B7) i pokazana w pracy Jarosińskiego (2005, Tectonophysics).

Wnioski dot. rozdz. IV.3 także obarczone są błędami metodologicznymi (m.in. nie uwzględnienie anizotropii, założenie normalnego reżimu naprężeń), przez co dość kategoryczne wypowiedzenie się na temat przyczyn niepowodzenia zabiegu szczelinowania w otworze L2H wydaje się mocno nieuprawnione. Tym bardziej, że dalej autorka powiela swój błąd związany z wnioskowaniem o wynikach modelowania 1D dla otworu L-1, stwierdzając: *„Elementem wprowadzającym niepewność wyniku końcowego są również same pomiary parametrów, zawsze z reguły obarczone błędami. W omawianym przykładzie wątpliwym wydaje się wynik testu szczelinowania hydraulicznego, na którym opiera się interpretacja warunków brzegowych modelu geomechanicznego i który nie koresponduje z uzyskanym obrazem zniszczeń z najbliższego odwiertu pionowego L-1”*.

Miejscami pojawiają się jednak pewne elementy dyskusji naukowej i autorefleksji:

„Podobnie jak w przypadku każdego modelu numerycznego, również w omawianym przypadku obiektu O3D mamy do czynienia z elementem niepewności wynikającym z wielu przyczyn, choćby nawet z niekompletności zawartości zestawu danych wejściowych i ewentualnych błędów pomiarowych różnych parametrów. Brak danych pomiarowych niektórych parametrów (np. stała Biota, kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na rozciąganie) spowodował, że modele tychże parametrów pozostały modelami teoretycznymi i nie zostały skalibrowane. To z kolei, w sposób negatywny wpływa na wiarygodność wyniku końcowego modelu geomechanicznego w postaci rozkładu naprężeń”

Dane kalibracyjne były jednak pośrednio dostępne, szczególnie dla modelu 1D, gdzie można było tak zmieniać parametry, by końcowy model zgodny był z obserwacjami.

Autorka dyskutuje także wpływ jakości i rozdzielczości danych sejsmicznych na uzyskane wyniki. Wielu elementów tej dyskusji spodziewałbym się, że zostanie omówionych wprost w rozdz. IV.3. Opis konstrukcji modelu strukturalnego jest tam b. ubogi – nie wiadomo np. czy nieciągłości są jego składową. Dane sejsmiczne nie zostały też wykorzystane w całości – np. nie wykorzystano modelu prędkości do predykcji Pp. Wydaje się, że rozdzielczość sejsmiki w kontekście generowania modelu 3D MEM jest wystarczająca – stawiałem zresztą wcześniej pytanie, co warunkowało pionową rozdzielczość tego modelu (ok. 25 m). W każdym razie nie upatrywałbym w sejsmice podstawowych źródeł niepewności modelowania.

W dyskusji brak jest autokrytycyzmu, np. z jednej strony doktorantka stwierdza, że: „Ograniczony zestaw danych wejściowych do budowy modeli parametrycznych, powoduje iż wyniki symulacji geomechanicznej kopalni Zofiówka obarczone są znaczną niepewnością. Pomimo to, zdaniem autorki pracy, poczynione uproszczenia i założenia nie powinny mieć istotnego wpływu na jakościową ocenę porównania efektywności analizowanych metod stymulacji pokładu węgla 412.”, a jednocześnie dalej, że: „Przeprowadzenie parametryzacji i kalibracji dostępnymi wynikami pomiarów laboratoryjnych jak też kompleksowe podejście do rozwiązania postawionego problemu badawczego sprawia iż **praca ma charakter wyraźnie innowacyjny** w tej stosunkowo przecież nowej w Polsce tematyce.”

Wśród napotkanych trudności, autorka wskazuje na brak wielu parametrów geomechanicznych i ograniczenia w ich pomiarach laboratoryjnych. To niewątpliwie prawda, pokazująca jednocześnie obraz badań geomechanicznych w kraju. Odnośnie dostępności do oprogramowania – z pewnością pojawienie się modułu geomechanicznego w oprogramowaniu firmy Schlumberger przyczynić się może do wdrożenia tego typu modeli do praktyki przemysłowej, jednak kluczowa okazuje się tu edukacja personelu. Wiele z omawianych problemów, da się zresztą rozwiązać stosując powszechnie używane kody, w tym open source, do modelowania FEM. Jako jeszcze jeden problem, doktorantka wymienia wysokie koszty obliczeniowe, implikujące nakłady na sprzęt. Jednak w pracy ani razu nie pojawia się informacja na ten temat – np. jak długo liczy się jedna realizacja modelu i na jakim sprzęcie (zwykły desktop, klastr obliczeniowy?).

4. Podsumowanie

We wstępie do rozdz. V, autorka stwierdza: „Podsumowując wyniki badań i eksperymentów obliczeniowych jak też konkretnych rozwiązań praktycznych zadań, stawianych aktualnie przez polski przemysł poszukiwań i eksploatacji węglowodorów, przedstawionych w niniejszej rozprawie, odniesiono się do pokazanego we wprowadzeniu sformułowania celu podstawowego oraz celu pośredniego rozprawy”.

Być może tak sformułowane wyjście naprzeciw oczekiwaniom przemysłu, przyczyniło się do takiego a nie innego doboru przykładów zastosowań geomechaniki, pokazanych w rozdz. IV.1-4, który w moim przekonaniu nie jest optymalny. Najciekawsze w kontekście praktycznych zastosowań i metodologii, byłoby porównanie konstrukcji modelu na potrzeby udostępniania złóż gazu łupkowego (rozd. IV.3) oraz modelu na potrzeby udostępniania złóż metanu z pokładów węgla (rozd. IV.4). Oba przypadki różnią się skrajnie zarówno jeśli chodzi o dostępność danych geologicznych/geofizycznych i petrofizycznych, jak i warunki geologiczne. Brakuje rzetelnej dyskusji obu przypadków w podsumowaniu pracy. W mojej ocenie, te dwa modele, opatrzone szerokim komentarzem i zrealizowane w wielu wariantach, mogłyby stanowić oś rozprawy (startując przy tym z modeli 1D MEM).

Przykład czysto syntetyczny z rozdz. IV.1 wydaje się bardzo „szkolny”, a jego odniesienie do realnej sytuacji stymulacji złoża, wątpliwe (trudno znaleźć takie miejsce, gdzie stosunek naprężeń poziomych będzie zbliżony do 1). W rozdz. IV.2 pokazano z kolei przykład jednowymiarowego (1D) modelu geomechanicznego, do którego dołożone zostały informacje z sejsmiki – zupełnie niepotrzebnie – bo potraktowanie sejsmiki (i jej opisanie) budzi sporo zastrzeżeń, a informację na temat regionalnego Shmax są dostępne z literatury (analiza breakoutów, zob. Jarośniński, 2005, Tectonophysics).

Odniosłem wrażenie, że część wyników pochodzi z różnych etapów pracy przy danym zagadnieniu, nie odwołując się wprost do siebie (dane wejściowe, etc.). Jest to szczególnie widoczne dla konstrukcji modelu 3D MEM i 1D MEM dla otworu L-1 w rozdz. IV.3.

Przywołując cele pracy zdefiniowane we wprowadzeniu do rozprawy, należy stwierdzić, że o ile cel w postaci „oceny potencjału badawczego” można uznać za zrealizowany, o tyle „opracowanie uniwersalnego schematu procedur” tylko częściowo, ze względu na wskazane wcześniej błędy metodologiczne.

Doktorantka stwierdza odnośnie wyników rozdz. IV.3, że „Zgodnie z wiedzą autorki, niniejsza rozprawa w chwili obecnej stanowi jedyne kompleksowe opracowanie dostarczające informacji o rozkładzie przestrzennym naprężeń na analizowanym obszarze. Obszar ten obejmuje również strefy o gorszym aktualnie rozpoznaniu geologicznym, a więc w przyszłości może stanowić kolejny cel poszukiwań”.

Rzeczywiście, jest to jedyne tego typu kompleksowe opracowanie, przy czym autorka przedstawiła MODEL rozkładu naprężeń, oparty zresztą na błędnych założeniach i w pewnych aspektach sfalsyfikowany przez obserwacje (brak breakoutów, nie utrzymanie stabilnego kierunku regionalnego S_{Hmax}). W strefach słabo rozpoznanych wiarygodność modelu będzie także niższa. Model może być wykorzystany przy projektowaniu udostępniania złoża, a nie w poszukiwaniach. Tym niemniej, wydaje się, że przy poprawkach w formie bardziej realistycznych założeń, model ten może dostarczyć ciekawych wniosków i zdecydowanie warto te założenia szerzej przetestować (np. wpływ anizotropii naprężeń czy stałej Biota < 1).

Podsumowując, należy stwierdzić, że doktorantka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, który składał się z konstrukcji modeli geomechanicznych 1D dla: kambryjskiego złoża piaskowców typu „tight” (Bałtyk), dolnopaleozoicznej formacji łupkowej Pomorza oraz modeli geomechanicznych 3D dla: dolnopaleozoicznej formacji łupkowej Pomorza oraz dla pokładu węgla w obrębie GZW. Opracowany schemat konstrukcji modeli geomechanicznych nie jest uniwersalny – tak jak odmienne są warunki panujące w różnych basenach osadowych - i nie brak w nim pewnych błędów, jednak wydaje się, że doktorantka biegle posługuje się narzędziami służącymi do integracji różnych zbiorów danych oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu reprezentowanej przez nią dyscypliny naukowej, jak również samodzielność w prowadzeniu pracy naukowej (choć powinna zdecydowanie wykazywać większą ostrożność w formułowaniu wniosków).

Pomimo ww. braków, w kontekście „macoszego” traktowania geomechaniki w programach nauczania na polskich uczelniach (również w poszukiwaniach naftowych), podjęta próba konstrukcji modeli geomechanicznych jest warta szczególnego odnotowania. W związku z powyższym, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska Mgr Małgorzaty Słoty-Valim pt. „GEOMECHANICZNY MODEL OŚRODKA GEOLOGICZNEGO JAKO NARZĘDZIE POSZUKIWAŃ, UDOSTĘPNIANIA I EKSPLOATACJI ZŁOŻ NIEKONWENCJONALNYCH” spełnia wymogi Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wnoszę tym samym do Rady Naukowej WGGiOŚ AGH o dopuszczenie pracy do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.

