

Prof. dr hab. Stanisław Mazur  
Instytut Nauk Geologicznych PAN  
Ośrodek Badawczy w Krakowie  
ul. Senacka 1, 31-002 Kraków

Kraków, 14/09/2020

### **Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Kasperskiej**

pt. „Struktura południowo-zachodniej części basenu bałtyckiego w świetle badań sejsmicznych”, przygotowanej pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Kaji Pietsch-Valenty w Katedrze Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

Recenzowana rozprawa stanowi studium geofizyczno-strukturalne wgłębnej budowy południowo-zachodniej części basenu bałtyckiego oparte na dostępnych danych sejsmicznych i otworowych. Głównym celem pracy jest stworzenie modelu budowy tektonicznej basenu na podstawie interpretacji strukturalnej danych sejsmicznych, bazującej na korelacji granic sejsmicznych. Zidentyfikowane geologicznie, z wykorzystaniem danych geofizyki otworowej, i skorelowane na zdjęciach sejsmicznych 2D i 3D horyzonty sejsmiczne umożliwiły rozpoznanie układu uskoku oraz wyznaczenie miąższości wytypowanych kompleksów skalnych w obrębie sekwencji dolnopaleozoicznej. Wyniki wykonanych badań są podstawą do odtworzenia ewolucji tektonicznej skłonu platformy wschodnioeuropejskiej we wczesnym paleozoiku oraz poznania mechanizmów subsydencji tektonicznej basenu w okresie czasu od otwarcia się Oceanu Tornquista po powstanie zapadliska przedgórskiego orogenu kaledońskiego. Otrzymane wyniki powinny przyczynić się również do lepszego rozpoznania w basenie bałtyckim stref mogących zawierać niekonwencjonalne złoża węglowodorów.

### **Struktura i zawartość rozprawy**

Tekst rozprawy obejmuje 144 strony druku, nie licząc streszczenia w języku angielskim dostarczonego na osobnej karcie. W skład rozprawy poza tekstem wchodzi spisy treści, rysunków i tabel, podziękowania, spis literatury oraz 9 załączników. Rozprawa zawiera 45 figur przygotowanych w formacie A4. Jedna z nich znajduje się na tzw. rozkładówce. W rozprawie są też 2 tabele. Spis wykorzystanej literatury obejmuje 89 pozycji, w tym 43 pozycje opublikowane za granicą.

Rozprawa zawiera 6 rozdziałów, w skład których wchodzi (1) wstęp, (2) zarys budowy geologicznej, (3) analiza danych sejsmicznych i otworowych oraz ich przygotowanie pod kątem interpretacji strukturalnej, (4) strukturalna interpretacja danych sejsmicznych, (5) weryfikacja modelu strukturalnego basenu bałtyckiego poprzez bilansowanie efektów kompaktacji i subsydencji oraz (6) podsumowanie. Na wspomniane 6 rozdziałów składa się w sumie 39 podrozdziałów pogrupowanych w 2 poziomach hierarchii.

We wstępie rozprawy (rozdział 1) zwrócono uwagę na postęp, jaki dokonał się w ostatnich dekadach w rozpoznaniu budowy basenu bałtyckiego dzięki zastosowaniu multidyscyplinarnych badań geologicznych i geofizycznych. Początkowo zainteresowanie tym obszarem związane było głównie z występującymi w karbońskich piaskowcach konwencjonalnymi złożami gazu ziemnego. Najnowsze badania basenu bałtyckiego koncentrowały się na niekonwencjonalnych złożach typu shale gas oraz shale oil w skałach dolnopaleozoicznych. We wstępie wyjaśniono motywy i cele podjęcia badań, których wyniki referowane są w rozprawie. Wyjściowym, głównym celem pracy było stworzenie modelu budowy tektonicznej południowo-zachodniej części basenu bałtyckiego na podstawie dostępnych danych sejsmicznych i otworowych. Jako drogę do realizacji tego celu przyjęto możliwie wierne i szczegółowe rozpoznanie trójwymiarowej geometrii strukturalnej obiektu badań oraz odpowiedzialnej za jej ukształtowanie sekwencji deformacji tektonicznych na obszarze położonym w polskiej, lądowej części basenu bałtyckiego. Potencjalnym celem dodatkowym, który pojawia się w dalszej części rozprawy jest lokalizacja potencjalnych pułapek dla węglowodorów w analizowanych strukturach.

W rozdziale 2 rozprawy przedstawiono lokalizację topograficzną i geologiczną basenu bałtyckiego. Oddzielnie rozpatrzono stratygrafię z podziałem na dolny i górny paleozoik oraz pokrywę permomesozoiczną. W prezentacji tła geologicznego ograniczono się do analizy kluczowych pozycji literaturowych z naciskiem na omówienie architektury facjalnej basenu.

W rozdziale 3 przedstawiono analizę dostępnych w ramach doktoratu danych sejsmicznych i otworowych. Celem ich przetworzenia i przygotowania pod kątem interpretacji strukturalnej wykonano wyrównanie przekrojów na krzyżówkach oraz geologiczne dowiązanie danych sejsmicznych do danych otworowych. Ponieważ dostępne dane sejsmiczne charakteryzował znaczny spadek rozdzielczości poniżej poziomu osadów permskich, zastosowano wieloetapowy algorytm, którego celem było podniesienie rozdzielczości poprzez usunięcie wpływu tłumienia sygnału sejsmicznego. Kolejny krok obejmował korelację danych otworowych w celu stworzenia kryteriów,

które ułatwią geologiczną identyfikację poszczególnych refleksów na przekrojach sejsmicznych. Na analizowanym obszarze wykonano interpretację granic refleksyjnych oraz identyfikację stref uskokowych w obrębie dwóch obszarów syneklizy bałtyckiej: (1) części zachodniej, w ramach której zinterpretowano 3 zdjęcia sejsmiczne 3D (Opalino 3D, Kochanowo-Tępcz-Częstkowo 3D i Wysin 3D) oraz 2 zdjęcia sejsmiczne 2D (Kościerzyna-Gdańsk 2D, Somonino-Przywidz 2D) oraz (2) części wschodniej, w której skład weszły wybrane profile z dwóch zdjęć sejsmicznych Żelazna Góra 2D oraz Górowo Łąweckie-Bartoszyce 2D.

W rozdziale 4 zaprezentowano wyniki interpretacji danych sejsmicznych w domenie głębokości. W tym celu wykonano model prędkości kompleksowych zbudowany na podstawie prędkości średnich z dostępnych otworów, który posłużył do konwersji danych sejsmicznych z domeny czasu do domeny głębokości. Do budowy modelu prędkościowego użyto krzywe prędkości średnich z otworów Opalino-2, Opalino-3, Opalino-4, Kościerzyna IG-1, Lubocino-1, Kochanowo-1, Wysin-1, Borcz-1, Darżlubie I-G1, Piasek-1, Rodnowo-1 oraz Kiwajny-1K. Otrzymany model składał się z 8 kompleksów prędkościowych o zmiennym gradiencie pionowym i poziomym obejmujących: (1) kredę i kenozoik, (2) jurę, (3) trias, (4) perm, (5) sylur, (6) ordowik, (7) kambry i (8) krystaliczne podłoże (proterozoik). Dla ostatniego z kompleksów przyjęto stałą prędkość 5000 m/s określoną na podstawie pomiarów w otworze Kościerzyna IG-1. Dodatkowo przy budowie modelu wprowadzono korekty tzw. poprawki resztkowe, czyli informacje z otworów na temat zalegania stropu danej warstwy. W oparciu o uzyskane przekroje głębokościowe oraz mapy opracowane dla poszczególnych horyzontów korelacyjnych wykonano analizę strukturalną kolejnych zdjęć sejsmicznych 3D i 2D. Do analizy wybrano następujące granice litostratygraficzne: strop krystalicznego proterozoiku, strop kambry, strop ordowiku i poziom ogniwa z Redy formacji z Kociewia. Dla tych granic wykonano kolejno mapy strukturalne oraz miąższościowe. Dodatkowo na przekrojach sejsmicznych zaznaczono strop syluru, strop permu, strop triasu dolnego, strop jury oraz strop kredy. Wszystkie te granice litostratygraficzne zostały wcześniej dowiązane do zapisu sejsmicznego za pomocą dostępnych danych otworowych. Interpretację rozpoczęto od analizy zdjęć 3D, ponieważ ich jakość jest znacznie lepsza aniżeli starszych zdjęć 2D, co pozwala na wyznaczenie dyslokacji nieciągłych o niewielkim zrzucie i zasięgu, niemożliwych do identyfikacji na zdjęciach 2D. Wobec tego, że pokrywą permomezozoiczną cechuje prosta budowa geologiczna, większą uwagę w pracy położono na charakterystykę struktur występujących w utworach dolnego paleozoiku i w prekambryjskim podłożu.

W rozdziale 5, w celu weryfikacji opracowanego modelu strukturalnego basenu bałtyckiego, podjęto próbę rekonstrukcji jego ewolucji we wczesnym paleozoiku. Bazując na wnioskach wynikających z analiz sejsmicznych, a także uzyskanych mapach strukturalnych wybranych horyzontów przewodnich skonstruowano profil Kościerzyna IG-1 – Wyręba-2 o długości 210 km, wzdłuż którego wykonano rekonstrukcję kolejnych epizodów deformacji z uwzględnieniem efektu kompaktacji osadów. Do realizacji tego zadania został wykorzystany program Move (Petex Ltd). Ze względu na niewielkie, w stosunku do długości profilu, przemieszczenia poziome na uskokach przyjęto, że głównym mechanizmem deformacji wypełnienia basenu była subsydencja tektoniczna i kompaktacja. Dobór krzywej kompaktacji uzależniono od dominującej litologii ośrodka oraz jego miąższości. Ze względu na istotny epizod erozji w karbonie, istotnym elementem bilansowania przekroju było również odtworzenie pierwotnych miąższości dewonu i syluru. Kolejne etapy restoracji przekroju obejmowały: (1) stworzenie intersekcji linii przekroju z modelem; (2) odtworzenie pierwotnej miąższości dewonu i syluru na podstawie map paleomiąższościowych; (3) dekompaktację kolejnych kompleksów osadowych; (4) rekonstrukcję przemieszczeń na uskokach. Wyniki modelowania porównano z wynikami backstriping'u 1D otrzymanymi przez Poprawę i in. (1999) dla otworu Kościerzyna IG-1. Wyniki przedstawiono, jako sekwencje przekrojów reprezentujących kolejne wybrane etapy odejmowania deformacji. Dekompaktacja osadów syluru nie skompensowała całkowicie ugięcia podłoża w zachodniej części profilu. Najprawdopodobniej pozostałe ugięcie jest związane z subsydencją tektoniczną zachodniego skraju platformy wschodnioeuropejskiej spowodowaną obciążeniem przez orogen kaledoński na zachodzie.

W ostatnim rozdziale, 6, przedstawiono podsumowanie i wnioski. Dokonano tu zestawienia i syntezy wyników przeprowadzonych badań poświęconych ewolucji tektonicznej południowo zachodniej części basenu bałtyckiego. Zaprezentowano zrekonstruowaną sekwencję deformacji od późnego ediakaru po sylur, a następnie wyniki retrodeformacji i modelowania.

#### Ogólna ocena rozprawy

Badania zrelacjonowane w ocenianej rozprawie oparte są na współczesnych koncepcjach w zakresie sejsmiki i analizy strukturalnej oraz na nowoczesnych technologiach, tak po stronie danych – wyników trójwymiarowych i dwuwymiarowych zdjęć sejsmicznych z południowo zachodniej części basenu bałtyckiego uzupełnionych o dane geofizyki otworowej, jak i po stronie metod ich analizy. Doktorantka wykazała się znajomością metod i narzędzi wykorzystywanych w przetwarzaniu danych sejsmicznych, ich korelacji oraz dowiązywaniu do danych otworowych, włączając w to profesjonalne oprogramowanie, jak i umiejętnością modelowania odwrotnego (*inverse modeling*) efektu kompaktacji

i subsydencji przy użyciu dwuwymiarowego modelu numerycznego. Zademonstrowała też sprawność innowacyjnego myślenia przy interpretacji strukturalnej danych sejsmicznych, opartej na metodach kartografii węgłębnej, takich jak tworzenie map strukturalnych horyzontów sejsmicznych oraz map miąższościowych kompleksów skalnych.

Za główne osiągnięcie recenzowanej pracy należy uznać wykorzystanie wysokorozdzielczej sejsmiki w korelacji z danymi otworowymi i geologicznymi do konstrukcji wiarygodnych modeli strukturalnych podłoża i wypełnienia basenu. Modele te pozwoliły na poszerzenie wiedzy o budowie i deformacji południowo zachodniej części basenu bałtyckiego w obrębie kompleksów skalnych reprezentujących kolejne przedziały czasu od późnego ediakaru po koniec syluru. Wyniki przeprowadzonych analiz tektonicznych mogą zostać wykorzystane do lepszego rozpoznania pułapek strukturalnych oraz stref mogących zawierać niekonwencjonalne złoża węglowodorów typu shale gas i shale oil, a także do budowy szczegółowych modeli geologicznych. Wyróżnić należy między innymi efektywne rozpoznanie i scharakteryzowanie trójwymiarowej geometrii strukturalnej podłoża basenu bałtyckiego, będącego obiektem o znacznym stopniu komplikacji budowy geologicznej. Obiekt ten jest położony w miejscu ważnym dla zrozumienia szerszych aspektów geologii zachodniego obrzeżenia platformy wschodnioeuropejskiej, a tym samym dla pogłębienia wiedzy o budowie geologicznej Polski. Na podkreślenie zasługuje staranny i atrakcyjny sposób przygotowania strony graficznej rozprawy, pozwalający na skuteczne przedstawienie czytelnikowi natury stosunków geometrycznych pomiędzy opisywanymi strukturami sejsmicznymi. Rozprawa jest napisana przy użyciu poprawnej geofizycznej terminologii fachowej, co razem z wymienionymi wcześniej zaletami pracy świadczy o dobrym opanowaniu przez doktorantkę warsztatu badawczego w zakresie geofizyki i kartografii podpowierzchniowej.

#### Uwagi krytyczne

Oprócz niekwestionowanych osiągnięć, recenzowana rozprawa ma – oczywiście – również swoje strony słabsze. Wśród nich należy wymienić niewłaściwie używaną terminologię stratygraficzną – terminy dla zespołów skalnych są stosowane dla przedziałów czasu np. ‘dolny’ zamiast ‘wczesny’ czy ‘górnny’ zamiast ‘późny’. Pewne mankamenty ma także terminologia tektoniczna. Na przykład wzmianka o „morzu geosynkliny kaledońskiej” w 55 lat po upowszechnieniu się tektoniki płyt jest już mocno spóźniona. Angielski termin ‘*plain strain*’ tłumaczy się jako ‘odkształcenie płaszczyznowe’, a nie „płaski stan odkształceń”. W zarysie budowy geologicznej są powołania na częściowo nieaktualne poglądy. W przypadku krystalicznego cokołu platformy wschodnioeuropejskiej chodzi tu o nieaktualny podział litostratygraficzny zainspirowany pracami Ryki (np. 1982). Pisanie o

występowaniu archaiku w polskiej części podłoża platformy wschodnioeuropejskiej jest już bardzo archaiczne.

W rozprawie nie wspomniano o niektórych konsekwencjach geologicznych uzyskanych wyników. Najważniejszą z pominiętych implikacji jest kwestia następstwa deformacji w basenie przedgórskim kaledonidów. Pożaryski (1990) wyróżnia na obszarze Pomorza dwa kaledońskie piętra strukturalne obejmujące, odpowiednio, utwory ordowiku i syluru. Natomiast Dadlez i in. (1994) uznają kompleks ordowicko-sylurski za strukturalnie jednorodną sekwencję skalną poddaną deformacji na przełomie syluru i dewonu. Można przypuszczać, że faza konwergencji na przełomie ordowiku i syluru musiałaby skutkować inwersją części uskoków w basenie przedgórskim, a także zmianą charakteru sedymentacji. Dlatego wyniki zaprezentowane w rozprawie stanowią ważny argument za hipotezą Dadleza i in. (1994). Dużym osiągnięciem rozprawy jest udokumentowanie zmiany architektury depozycyjnej basenu w przydolu. Kształt depocentrum w tym czasie wskazuje na położenie obciążenia tektonicznego powodującego uginanie płyty na północy i północnym zachodzie, czyli w obrębie kaledonidów skandynawskich. Jednak finalna inwersja basenu przedgórskiego kaledonidów musiała mieć miejsce w polu skrócenia o orientacji WSW-ENE. Wskazuje na to orientacja frontu deformacji kaledonidów pomorskich oraz inwersja uskoków o orientacji NW-SE w zachodniej części badanego obszaru. W polu kompresji o orientacji NNW-SSE uskoki te pozostałyby w większości niewrażliwe na inwersję, co nie zostało wyczerpująco przedyskutowane w rozprawie.

Praca ma także pewne drobne błędy edytorskie. Rysunki w rozdziale 3 począwszy od rysunku 3.19 mają błędną numerację. Prace Modlińskiego i in. (2006) oraz Poprawy i in. (2006) są różnie cytowane w tekście. Prac Stolarczyka i Tyski (1972a, b, 1979a) brak w spisie literatury. Kilka prac wymienionych w spisie literatury nie jest cytowanych w tekście: Jaworowski (1982), Poprawa (2019) oraz Stypa i in. (2017). Praca Sun i in. (2000) figuruje w spisie literatury jako rok 2002. Praca Krzywca i in. (2014) ma niekompletne cytowanie w spisie literatury. Rozprawa zawiera także szereg literówek i drobnych błędów gramatycznych, które są wyszczególnione w uwagach szczegółowych.

#### Uwagi dyskusyjne

W kilku miejscach rozprawy, np. na stronach 12 i 59, jest mowa o waryscyjskim wznoszeniu i erozji. Taki jest klasyczny punkt widzenia zawarty w literaturze i nie czynię tu zarzutu z odwołania się do niego w rozprawie. Nie znaczy to, że jest to pogląd prawdziwy. Basen bałtycki niemal w całości znajduje się poza zasięgiem frontu deformacji waryscyjskiej (np. Mazur i in. 2020). Oczywiście nie podważa to obserwacji, że baseny na przedpolu orogenu uległy waryscyjskiej inwersji w trakcie

ostatniego epizodu konwergencji, który miał miejsce w najpóźniejszym westfalu (np. Krzywiec i in. 2017; Mazur i in. 2020). Faktycznie wieki K-Ar illitu w basenie lubelskim, leżącym w większości w obrębie orogenu warwscyjskiego, są wczesnopermskie (290-270 Ma) wskazując na wypiętrzenie po orogenezie warwscyjskiej (Kowalska i in. 2019). Natomiast wieki K-Ar illitu w basenie bałtyckim są wczesnokarbońskie (340-330 Ma; Kowalska i in. 2019) implikując wypiętrzenie w karbonie zanim konwergencja warwscyjska dotarła na ten obszar. Przedwarwscyjskie wypiętrzenie w karbonie mogło mieć związek z wczesnokarbońskim wulkanizmem (Poprawa 2019) i związaną z nim kopułą termiczną. Co ciekawe w rozdziale 5 rozprawy rekonstrukcja zerodowanej sekwencji osadowej obejmuje jedynie górny sylur i dewon, a pomija karbon. Jest to podejście właściwe, ale niekompatybilne z założeniem o warwscyjskim wieku wypiętrzenia basenu.

Na rysunku 5.4D północno-wschodni koniec bilansowanego modelu znalazł się na głębokości około 900 m. Tymczasem w najwyższym ordowiku występują tam facje płytkowodne (formacja z Prabut) powstałe w zakresie głębokości od 0 do 100 m. Gdyby model skorygować przesuwając go odpowiednio w górę to dno basenu w rejonie otworu Kościerzyna IG-1 znalazłoby się na głębokości około 1000 m, co jest zgodne z wcześniejszymi szacunkami (np. Modliński i Podhalańska 2010).

#### Wybrane uwagi szczegółowe do ocenianej rozprawy

Na stronie 5 powinno być 'multidyscyplinarnych' zamiast 'mulitdyscyplinarnych'. Najnowsze badania 'koncentrują się', a nie „koncertują”. Nazwiska autorów odmienia się przez przypadki.

Na stronie 8 stwierdza się, że dolny kompleks litologiczny dolnego kambru powstał w górnym [późnym] wendzie [ediakarze].

Na stronie 12 powinno być „wapieni marglistych”.

Na stronie 16 powinno być „w wyniku przesunięcia” oraz „osadów triasu”.

Na stronie 19 powinno być „wschodniej części”.

Na stronie 21 powinno być „budowy geologicznej” zamiast „budowy strukturalnej”.

Na stronie 24 powinno być „obszaru badań”.

Na stronie 27 lepiej napisać „profil litologiczny” zamiast „rozwiązanie litologiczne”. Powinno też być „impedancja akustyczna”. Na stronie 28 i dalej – dwóch pisze się '2' zamiast „2-ch”.

Na stronie 38 i dalej powinno być „współczynnika dobroci”. Słowo „podpermski” pisze się razem. Słowo „dolnopaleozoicznym” piszę się bez myślnika.

Na stronie 39 i dalej słowo „poprzez” pisze się razem.

Na stronie 43 powinno być „umożliwiają geologiczną identyfikację”. Słowo 'litostratygraficzny' pisze się bez myślnika (tu i w innych miejscach).

Angielski termin 'time slice' nie odmienia się po polsku na stronie 54.

Na stronie 55 powinno być „parametry opisujące”, a na stronie 58 „od kambru”.

Rysunek 4.4 jest przywołany na stronie 60 przed rysunkami 4.2 i 4.3.

Na stronie 69 nie jest jasne, dlaczego „uskoki normalne o małym zrzucie” miałyby wskazywać na przesuwczą reaktywację starszych uskoków.

Na stronie 99 chodzi chyba o przebudowę depozycyjną basenu, a nie „przebudowę strukturalną”.

Niezręczne jest pisanie na stronie 100 o „działalności kaledonidów”. W tym przypadku chodzi o uginanie płyty na przedpolu kaledonidów.

Na stronie 106 niezręcznie jest pisać o zorientowaniu przekroju równoległe do „kierunku regionalnego transportu tektonicznego”, bo takowy w badanym terenie praktycznie nie występuje. W metodologii bilansowania przekrojów chodzi o zachowanie stałej powierzchni przekroju kompleksów skalnych w trakcie retrodeformacji.

Na stronie 110 powinno być „map paleomiąższościowych”.

Na stronie 114 powinno być „stworzenie modelu”. Słowo „wczesnopaleozoiczny: pisze się razem.

Na stronie 115 powinno być „ediakar”, a nie „edikar”, a na stronie 118 „fleksuralnego wygięcia”.

#### Podsumowanie recenzji

W recenzowanej rozprawie zdecydowaną przewagę mają oryginalne osiągnięcia badawcze autorki, świadczące o jej wiedzy i opanowaniu warsztatu badawczego w zakresie sejsmiki, analizy strukturalnej i kartografii wgłębnej, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

Rozprawa zawiera oryginalne i metodycznie poprawne rozwiązanie zagadnienia naukowego, polegającego na stworzeniu modelu budowy tektonicznej południowo-zachodniej części basenu bałtyckiego. Tym samym recenzowana praca jednoznacznie spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. art.18 a ust. 5 z późniejszymi zmianami (tekst jednolity w Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) oraz przez rozporządzenie MNiSW z dnia 19 stycznia 2018 r. (Dz. U. 2018 r. poz. 261). Na tej podstawie recenzent wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Moniki Kasperskiej do publicznej obrony przedstawionych w jej rozprawie tez. Ze względu na duże walory merytoryczne rozprawy, wnioskuje również, aby wystąpić o jej wyróżnienie stosowną nagrodą.



Kraków, 14 września 2020 r.