

## Recenzja

### pracy doktorskiej mgr Michała Dąbrowskiego

*pt. Analiza struktur geologicznych i obiektów antropogenicznych  
w osadach czwartorzędowych metodą georadarową*

wykonanej pod kierunkiem dr hab. Arkadiusza Krawca, prof. UMK

Recenzja rozprawy doktorskiej **mgr Michała Dąbrowskiego** została wykonana zgodnie z umową z dnia 1 kwietnia 2022r. na podstawie przesłanej pracy doktorskiej i zawiera ocenę wymagań określonych w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003r. *o stopniach i tytule naukowym* .....

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 131 stron tekstu i 8 stron wykazu cytowanej literatury. Tekst obejmuje 7 rozdziałów.

Oprócz tego na końcu rozprawy zamieszczone są: spis rycin – 5 stron, spis tabel – 1 strona, a także spis 8 załączników oznaczonych od A do H – 49 stron.

### Ocena rozprawy

**Rozdział 1. Wstęp.** Doktorant w sposób zwięzły, w kilku zdaniach, przedstawił metodę georadarową i wskazał na nowatorski wielokanałowy system 3D. Wskazał także na możliwości różnych technik interpretacji wyników.

W rozdziale tym przedstawił stanowiska badawcze, których było łącznie 8 i zakres prac na każdym z nich. Pięć z nich dotyczyło rozpoznania struktur osadów czwartorzędowych, a trzy rozpoznania obiektów antropogenicznych.

Przedstawione we wstępie informacje nawiązują do tytułu rozprawy.

**Rozdział 2. Cel i zakres pracy.** W sposób zwięzły i zrozumiały doktorant przedstawił tu główne cele swojej pracy – zastosowanie metody GPR do analizy struktur osadów czwartorzędowych oraz obecnych w nich obiektów o charakterze antropogenicznym, a całość badań dotyczy obszaru Niżu Polskiego. Przedstawiony w rozdziale tym zakres prac zarówno terenowych jak i interpretacyjnych jest bardzo szeroki, ale uważam, że wyjątkowo trafny i celowy. Obejmuje on nie tylko wykonanie samych prac terenowych – pomiary GPR, geodezyjne,

geotechniczne, ale także pełną ich dokumentację, analizę i bardzo szeroką interpretacją łącznie wizualizacją i modelowaniem 3D. To bardzo podnosi wartość naukową pracy.

Uważam, że przedstawione tu możliwości i ograniczenia metody georadarowe są zbędne, tym bardziej, że w rozdziale 4 są dokładnie omówione.

Brakuje tu wyraźnego uzasadnienia wyboru stanowisk badawczych.

**Rozdział 3. Przegląd dotychczasowych badań georadarowych.** Autor dokonał tutaj, i słusznie, rozdziału na badania prowadzone w Polsce oraz badania prowadzone zagranicą. W odniesieniu do badań prowadzonych w naszym kraju, brak jednak wzmianki o wkładzie jaki wniósł tu Główny Instytut Górnictwa, a w szczególności zespół dr inż. Kotyrby, który był jednym z jej prekursorów w Polsce. Przegląd literatury światowej jest z kolei skromny i autor ograniczył go do kilkunastu pozycji. W znacznej mierze są to pozycje starsze i publikowane w materiałach konferencyjnych. Tematyka badań GPR jest bardzo szeroka, a różnym jej aspektom są poświęcane nie tylko pełne sesje na dużych konferencjach międzynarodowych np. SAGEEP, ale i całe konferencje np. w bieżącym roku już 19th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2022), w Colorado.

**Rozdział 4. Metoda georadarowa i możliwości jej zastosowania. Na wstępie** Doktorant w kilku zdaniach opisał metodę georadarową. Nie ustrzegł się jednak kilku nieścisłości, np. zasadę pomiaru ujął w sposób „literacki”, pisząc: „*Georadar, wykonując pomiar wzdłuż zadanego profilu pomiarowego, generuje impulsy i nasłuchuje fal odbitych pochodzących z badanego ośrodka...*”

W podstawach teoretycznych metody georadarowej Doktorant przytacza fundamentalne dla niej równania, nazywając je równaniami Maxwella. Faktycznie są to równania materiałowe definiujące ośrodek, które wiążą ze sobą równania Maxwella i opisują elektryczne i magnetyczne właściwości tego ośrodka. Nie podaje też jednostek definiowanych wielkości. Autor niejednoznacznie posługuje się parametrem przenikalności elektrycznej. Wskazuje, że w badaniach georadarowych jednym z najistotniejszych parametrów definiujących badany ośrodek jest względna przenikalność elektryczna, zw. stałą dielektryczną, zaś we wzorze nr 4 używa przenikalności elektrycznej. Są też niezgodności w wartościach prędkości rozchodzenia się fali podanych w tekście i w Tab.1. Drugim, bardzo ważnym parametrem związanym z przenikalnością elektryczną, na co też wskazał autor, jest współczynnik odbicia. Dla modelu 2-warstwowego szczegółowo on został omówiony w **Zał. A**.

Szczegółowo i co istotne zrozumiale, Doktorant przedstawił zagadnienie rozdzielczości w badaniach georadarowych. Konsekwentnie jednak nie podaje jednostek parametrów fizycznych.

W rozprawie zdecydowanie brakuje pełnego wykazu zmieszczonych oznaczeń wraz z podaniem ich wymiaru i nazwy. Autorowi ułatwiłoby to pisanie, a czytelnikowi śledzenie i zrozumienie tekstu. Rozdział ten autor kończy krótką informacją o aparaturze georadarowej zastosowanej w badaniach i jej producentach. Szczegółowo zaś przedstawił to w **Zał. B**.

**Rozdział 5. Wyniki badań.** Rozdział ten Doktorant rozpoczyna od opisu 5 metod pomocniczych, które wykorzystał w swoich badaniach oraz przy późniejszej interpretacji. Szczególnie zwrócił tu uwagę na modelowanie numeryczne, które jest nowoczesnym narzędziem interpretacji. Zagadnienie to przedstawił zwięźle i zrozumiale. Dodatkowo poparł je szeregiem rysunków własnego autorstwa.

W dalszej części tego rozdziału, w podrozdziale 5.1, autor szeroko przedstawia metodykę badań georadarowych 2D i 3D oraz techniki interpretacji danych. Rozpoczyna od omówienia kształtu hiperboli dyfrakcyjnej, podaje od czego zależy jej nachylenie i jak istotnym jest prawidłowe dobranie prędkości fali do interpretacji danych. Wszystko to bogato ilustruje rysunkami własnego autorstwa. Następnie przechodzi do badań 2D przedstawiając ich zalety i niejednoznaczności. Omawia modelowanie 2D w ośrodku 2-warstwowym oraz 3-warstwowym. Szczegółowo rozpatruje tu kilka przypadków: gdy pomiar realizowany jest zgodnie z upadem warstw, zgodnie z biegiem warstw oraz nad strefą uskokową. Wszystko to ilustruje rysunkami własnego autorstwa. W metodyce 3D omawia sposób wykonania pomiarów wraz z procesami przetwarzania danych i jej zalety w porównaniu z 2D.

Podsumowując, podrozdział 5.1 wskazuje na szerokie spojrzenie autora na badania georadarowe wraz z interpretacją wyników, co jest bardzo cenne. Wskazuje też na jego duże doświadczenie i solidność. Celowe byłoby jednak, gdyby te metody opisane zostały w oddzielnym rozdziale lub podrozdziale, a nie przy wynikach badań.

W kolejnych podrozdziałach, od 5.2 do 5.7 autor krótko opisuje wykonane prace badawcze wraz z otrzymanymi wynikami na kolejnych swoich stanowiskach. Łącznie było to 8 stanowisk.

4 z nich dotyczyły rozpoznania budowy geologicznej – litologii osadów czwartorzędowych i były to stanowiska: Młyniec Pierwszy, Jarki w dolinie Zielone Strugi i Krasne k. Suwałk, gdzie badania georadarowe wykonano w metodyce 2D oraz Jedwabno w dolinie Drwęcy, gdzie badania georadarowe wykonano w metodyce 2D i 3D.

1 stanowisko, we Władysławowie, wiązało się z rozpoznaniem warunków hydrogeologicznych, a konkretnie wpływem ingresji wód słonych w strefie brzegowej Bałtyku oraz zobrazowaniem struktur wydm. Badania wykonano w metodyce 2D.

2 stanowiska to klasyczne rozpoznanie obiektów archeologicznych, z czego na jednym, w Uniejowie badanie wykonano w wersji 2D, a na drugim przy pałacu w Skrzynce w wersji 2D i 3D.

Ostatnie stanowisko, w Stegnie, dotyczyło rozpoznanie skażenia ropopochodnego wraz z obecną tam jeszcze infrastrukturą. Badania wykonano w wersji 3D.

Wszystkie stanowiska zostały bardzo bogato udokumentowane graficznie. Wyniki przedstawiono na echogramach, a także w formie wizualizacji 2D i 3D.

Zamieszczona w rozprawie graficzna dokumentacja wyników w sposób znakomity uzupełniła krótki opis każdego ze stanowisk badawczych.

**Rozdział 6. Dyskusja na temat wyników.** Rozdział ten zatytułowałbym raczej „*Dyskusja wyników*”. Autor uzasadnia tu celowość podjęcia badań georadarowych w osadach czwartorzędowych, które są trudne dla większości metod geofizycznych. Wskazuje nie tylko na trudności i wieloznaczność interpretacji, ale także na możliwości jej ograniczenia np. wykorzystanie informacji o budowie geologicznej z odwiertów. Uważam, że wykorzystanie wszystkich dostępnych informacji geologicznych, czy geotechnicznych przy interpretacji wyników badań geofizycznych jest nie tylko wskazane i celowe, ale powinno być obowiązkiem każdego interpretatora. W rozprawie autor udowodnił celowość stosowania pomiarów w wersji 3D oraz modelowania numerycznego, które w wielu przypadkach pozwala weryfikować założenia interpretacyjne. W przypadku rozprawy doktorskiej modelowanie 3D dało bardzo dobre wyniki na wszystkich stanowiskach badawczych, na których autor takie modelowanie wykonał, tj.: Jedwabno, pałac w Skrzynce oraz Stegna.

W rozdziale tym, uzupełnionym w **Zał. B** autor wykazuje także różnice pomiędzy trzema typami zastosowanych aparatów georadarowych, tj. U-Explorer firmy Geoscanners AB, DS2000 firmy Leica i Stream C firmy IDS Georadar. Jednoznacznie wskazuje, że największe możliwości badawcze posiada aparatura Stream C.

Stanowisko Młyniec k. Torunia było pierwszym i zarazem testowym stanowiskiem badawczym. Autor wykazał tu możliwości wykorzystania badań georadarowych do rozpoznania struktur w czwartorzędowych piaskach i żwirach, a zdobyte doświadczenia pozwoliły mu prawidłowo zaplanować badania na następnych stanowiskach. Takie podejście do badań uważam za w pełni profesjonalne. Autor wskazuje tu na bardzo duże tłumienie fali w osadach ilastych (glinach) oraz glebie. Potwierdza zatem dane literaturowe. Nie wspomina jednak z czego to tłumienie wynika.

Na kolejnym stanowisku, tj. Jarki w dolinie rzeki Zielonej autor koreluje wyniki badań georadarowych z danymi z otworów badawczych (**Zał. D**) i wykazuje, że zmiany prędkości w danej warstwie są pochodną zawilgocenia i kompaktacji. Wzrost zawilgocenia / zawodnienia znacznie tłumi falę radarową.

Na stanowisku Jedwabno autor po raz pierwszy zastosował skonfigurowany przez siebie georadar wielokanałowy Stream C, a pomiary wykonał w wersji 3D. Uzyskane wyniki skorelowane zostały następnie z pomiarami wykonanymi w wersji 2D georadarem jednokanałowym Leica DS2000. Uzyskane wyniki wskazały, że prawie dwukrotnie większą głębokość penetracji uzyskuje się w technologii 2D. Technologia 3D daje zaś zdecydowanie większą rozdzielczość. Pozwala dokładnie określić kąty zapadania warstw i kierunki upadów, a zatem opracować model przestrzenny warstw. Autor trafnie tu wskazuje, a nawet proponuje, by metodą 2D stosować do wstępnego rozpoznania budowy geologicznej, a 3D do rozpoznania szczegółowego.

Na stanowisku we Władysławowie autor wykazuje możliwości zastosowania metody 2D do rozpoznania budowy geologicznej wydm nadmorskich oraz ingresji wód słonych w strefie brzegowej Bałtyku. Uzyskane wyniki w pełni korelują z wcześniejszymi badaniami opornościowymi metodą ERT. Dodatkowo autor wykazuje, że na głębokość penetracji ma wpływ rodzaj gleby. Gleby ciężkie, z wysoką zawartością substancji organicznych i podwyższoną minerałów ilastych znacznie bardziej tłumią falę radarową niż gleby lekkie biellicowe.

Na stanowisku Krasne badania prowadzone były pod kątem dokumentowania struktur wytopiskowych. Struktury te najczęściej wiążą się z obecnością osadów gliniastych. Autor wykazuje tu, że na takich obszarach płytka penetracja fali radarowej – mały zasięg głębokościowy świadczy o obecności utworów gliniastych, a głębsza penetracja utworów piaszczysto-żwirowych, które korelują z miejscami wytopiskowymi.

Pozostałe 3 stanowiska badawcze autor określa wspólnym mianem stanowiska antropogeniczne. O ile z takim nazewnictwem można zgodzić się w odniesieniu do stanowisk w Skrzynce przy pałacu oraz w Uniejowie, chociaż bardziej właściwe byłoby określenie „stanowiska archeologiczne”, o tyle stanowisko w Stegnie dotyczy klasycznego rozpoznania skażenia ropopochodnego i źródła jego pochodzenia.

Badania na stanowiskach w Skrzynce i Uniejowie potwierdziły skuteczność metody georadarowej w rozpoznawaniu obiektów archeologicznych. Obiekty archeologiczne najczęściej zalegają na głębokości do kilkudziesięciu centymetrów. Badania metodą 3D w Skrzynce potwierdzają wniosek autora, że obecnie z metod georadarowych jest to metoda najbardziej skuteczna. Słusznie więc jest rekomendowana w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Bardzo interesujące jest ostatnie stanowisko badawcze w Stegnie. Metodą georadarową 3D autor określił tu genezę wycieku substancji ropopochodnej. Z każdym takim wyciekiem oczywiście wiąże się skażenie substancją węglowodorową. Stanowisko to wskazuje na możliwości zastosowania metody georadarowej nie tylko do lokalizacji infrastruktury podziemnej związanej np. z przesyłem produktów ropopochodnych czy ich magazynowaniem, ale także sugeruje możliwość kartowania / okonturowywania skażeń ropopochodnych. Dla mnie jest to stanowisko najbardziej interesujące. Szkoda, że autor nie pokusił się wykonać badań na obszarze skażonym, ale przy braku infrastruktury podziemnej.

**Rozdział 7. Podsumowanie.** Autor wskazuje tu na kolejne, istotne etapy badań georadarowych jak: dobór odpowiedniej metody pomiarowej, procedury przetwarzania danych w tym modelowanie numeryczne oraz wizualizacja. Podkreśla znaczenie kolejnych etapów prac oraz wykorzystanie dostępnych informacji geologicznych. Na etapie interpretacji, na obszarach o zróżnicowanej morfologii proponuje uwzględniać topografię terenu, Przy zaawansowanych badaniach, interpretacja powinna być zarówno jakościowa jak i ilościowa, co powszechnie stosowane jest w innych metodach geofizycznych. Badaniami radarowymi autor udowadnia występowanie anizotropii prędkości fali w osadach czwartorzędowych.

Uważam, że znaczącym osiągnięciem autora jest modyfikacja georadaru 3D Stream C na potrzeby pomiarów w trudnych warunkach terenowych i opracowanie procesu przygotowania jego danych do interpretacji. Same bowiem badania w wersji 3D wykonywane są już od dawna (praca H. Marcaka i in., 2005).

W rozdziale tym autor również krytycznie podchodzi do badań metodą georadarową, co jest cenne i wskazuje na duże jego doświadczenie i naukowe podejście do uzyskanych wyników.

### Podsumowanie recenzji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ma charakter aplikacyjny i stanowi oryginalne opracowanie naukowe oparte o wyniki badań terenowych na 8 stanowiskach badawczych. Na każdym z nich autor rozwiązuje inny problem. Sposób formułowania celów badawczych, realizacja założeń oraz forma przedstawienia wyników badań wskazują, że Pan Michał Dąbrowski bardzo dobrze orientuje się w zakresie prowadzenia badań metodami georadarowych, interpretacji danych oraz wizualizacji wyników.

Recenzowana rozprawa doktorska jest pracą interdyscyplinarna. Łączy metodę georadarową z badaniami na potrzeby szeroko rozumianej geologii, ochrony środowiska i archeologii.

W bibliografii zostało wykazanych 101 pozycji łącznie ze stronami www. W tekście nie doszukałem się jednak 4 pozycji, tj.: Bertolla i in., 2014; Krawiec A., 2021; Yilmaz O., 2001 oraz Sadurski i Krawiec, 1998. Sposób cytowania literatury jest zgodny z ogólnie przyjętym schematem, a jej zakres tematyczny został dobrany właściwie.

Edycja pracy jest staranna zarówno w zakresie tekstu jak i bardzo bogatej części graficznej. Recenzentowi trudno było znaleźć drobne błędy lub literówki. Nieliczne błędy oraz niewłaściwe, zdaniem recenzenta, niektóre sformułowania nie wpływają na wartość naukową pracy. Przykładowo, niektóre opisy na rysunkach są za małe i nie można ich odczytać – Rys, nr 4, 11, 20. Termin „*georadar nasłuchuje fal odbitych*” nie jest najlepszy. Właściwsze byłoby rejestrowanie czasów dojścia fali.

Założone cele autor w pełni osiągnął, co udokumentował w dyskusji wyników i podsumowaniu.

Bardzo dobrze opisał procedurę przetwarzania danych i modelowanie numeryczne wraz z wizualizacją. Całość odpowiada tytułowi pracy.

Wobec powyższego stwierdzam, że poziom naukowy wykonanych badań wraz z interpretacją wyników przedstawioną w rozprawie doktorskiej potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez doktoranta.

#### Ocena końcowa

**Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr Michała Dąbrowskiego, pt. „Analiza struktur geologicznych i obiektów antropogenicznych osadach czwartorzędowych metodą georadarową” spełnia kryteria stawiane rozprawom doktorskim i odpowiada wymogom przedstawionym w Ustawie z dn. 14.03.2003 r., o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami).**

**Wniosuję do Rady Dyscypliny Nauki o Ziemi i Środowisku Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu o dopuszczenie mgr Michała Dąbrowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Dr hab. Bogdan Żogała



Sosnowiec, 0.6-06-2022.