

Dr hab. inż. Tomisław Gołębiowski, prof. PK

Kraków, 27.08.2017 r.

*Politechnika Krakowska*

*Wydział Inżynierii Środowiska*

*Instytut Geotechniki*

*Zakład Geodezji, Geofizyki i Geologii Inżynierskiej*

*ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków*

*tel.: (12) 628-31-97; e-mail: goleb@wis.pk.edu.pl*

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza Tanajewskiego**

**pt. „*Badanie przydatności zintegrowanych pomiarów georadarowych i GNSS do geodezyjnej inwentaryzacji obiektów i struktur podpowierzchniowych*”**

Rozprawa doktorska została przygotowana na Wydziale Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, a promotorem pracy był dr hab. inż. Dariusz Popielarczyk.

Praca składa się z Wprowadzenia, 7 rozdziałów (ostatni rozdział to Wnioski), spisu literatury, osobnego wykazu tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa doktorska liczy 187 stron, zawiera 6 tabel, ilustrowana jest 74 rysunkami oraz zacytowano w niej 68 pozycji literaturowych.

W rozprawie doktorskiej Autor przeprowadził analizę dokładności pozycjonowania granic geologicznych oraz obiektów antropogenicznych przy wykorzystaniu zintegrowanego systemu geofizyczno-geodezyjnego, tj. systemu GPR (*Ground Penetrating Radar*) oraz GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). Zintegrowany system GPR-GNSS może znaleźć zastosowanie w geodezyjnej inwentaryzacji sieci uzbrojenia terenu oraz lokalizacji podziemnych obiektów niedostępnych lub trudnodostępnych.

We Wprowadzeniu do pracy Autor stawia następującą tezę: „Zintegrowane pomiary georadarowe i pomiary satelitarne, przy zastosowaniu właściwych procedur pomiaru oraz z uwzględnieniem wzajemnych ograniczeń, mogą stanowić wiarygodne źródło danych przestrzennych na temat obiektów i warstw podpowierzchniowych”.

**W tym miejscu pojawiają się dwa pytania do Autora:**

- 1) Czy z tak postawionej tezy nie wynika czasem, że producenci aparatury georadarowej wprowadzając kilkanaście lat temu na rynek systemy GPR zintegrowane z systemami GNSS nie przeprowadzili testów dokładności lokalizacyjnej oraz wzajemnych zakłóceń w pracy takich zintegrowanych systemów, pozostawiając to zadanie użytkownikom systemów GPR-GNSS.
- 2) Co nowatorskiego/innego/niestandardowego znajduje się w rozprawie Autora w stosunku do pracy doktorskiej dr. inż. Łukasza Ortyła, obronionej na AGH w 2006 roku, która nosi bardzo podobnym tytuł, tzn.: „*Badanie przydatności metody georadarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów podpowierzchniowych*”; co nowego wnosi rozprawa Autora w odniesieniu do cytowanych przez niego prac Rial i in. (2005, 2013) oraz Ortyl (2006b,c).

W rozprawie doktorskiej Autor przeanalizował wzajemny wpływ obu urządzeń (tj. GPR i systemów GNSS) na rejestrowane przez nie dane; wnioski z tych testów pokazują, że przy odpowiednim zamocowaniu (oddaleniu) anteny systemu satelitarnego od anteny georadarowej wzajemne zakłócenia są niewielkie.

Przy integracji wyników pomiarów GPR i GNSS Autor zauważył, że nie można zagwarantować ciągłości pomiaru GNSS o najwyższej dokładności, co może wpłynąć na duże błędy pozycjonowania anteny georadarowej i w efekcie na nieprawidłową interpretację struktur geologicznych czy obiektów antropogenicznych. Kolejne niedokładności pozycjonowania mogą pojawić się również na etapie transmisji i integracji danych pomiędzy systemami GPS i GNSS.

Podczas prowadzenia badań do doktoratu, Autor odnotował bardzo duże błędy pomiaru wysokości z wykorzystaniem systemów GNSS, które wynikały prawdopodobnie z wykorzystania ogólnego modelu geoidy do przeliczenia wysokości z elipsoidalnych na normalne.

**Po analizie wniosków wyciągniętych przez Autora nasuwa się więc najważniejsze pytanie: czy przy obecnej dokładności i niepewności lokalizacyjnej systemów GNSS warto przechodzić na zintegrowane systemy GPS-GNSS, czy też na razie raczej należałoby pozostać przy „klasycznej geodezji” (tj. tachimetr, niwelator, dalmierz laserowy, taśma miernicza i in.), która pozwala, w odpowiednich warunkach terenowych, zachować dokładność lokalizacyjną rzędu centymetrów.**

Autor zauważył, że nie udało się przy pomocy metody GPR skartować przebiegu wszystkich granic geologicznych wyznaczonych z wierceń. Jest to często obserwowana sytuacja w geofizyce, ponieważ o tym czy zarejestrujemy efekt od granicy geologicznej decyduje nie tylko fakt istnienia tej granicy, lecz przede wszystkim kontrasty parametrów fizycznych pomiędzy poszczególnymi formacjami geologicznymi. Powyższy wniosek dotyczy się również lokalizacji obiektów antropogenicznych w ośrodku geologicznym.

Autor stwierdza, iż metoda GPR może być z powodzeniem stosowana w batymetrii i można przy jej pomocy szacować miąższość (a w pewnych warunkach również typ) osadów dennych. Podczas badań na zbiorniku wodnym, Autor zlokalizował z satysfakcjonującą dokładnością również obiekt antropogeniczny ulokowany na dnie zbiornika wodnego.

Od wielu lat wyniki badań geofizycznych (m.in. georadarowych) korelowane są z pomiarami uzyskiwanymi z „klasycznej geodezji”, co pozwala na wizualizację ośrodka geologicznego w układzie 3D, oraz często stosuje się wizualizację 4D (x, y, z, t - czas) w celu nieinwazyjnego monitorowania procesów zachodzących pod powierzchnią terenu. Również w swojej pracy Autor zaproponował wizualizację 3D w oparciu o zintegrowane pomiary GPR-GNSS w celu stworzenia modeli dla środowiska GIS.

W początkowej części pracy (w części teoretycznej) za najbardziej wartościowy uważam Rozdział 3.4.2 „Ograniczenia w procesie integracji”, który wnosi dużo ważnych informacji z punktu widzenia tematu rozprawy doktorskiej. Rozdziały 4, 5 i 6 stanowią najważniejszą i najciekawszą część pracy, w których Autor samodzielnie przeanalizował wpływ aparatury GPR na pomiary satelitarne i odwrotnie oraz przeprowadził pomiary, przetwarzanie, wizualizację i interpretację zintegrowanych badań GPR-GNSS w celu rozpoznania budowy geologicznej, detekcji obiektu antropogenicznego oraz badań batymetrycznych.

Bardzo ważnym i wartościowym rozdziałem jest Rozdział 5.3.4, w który Autor przeprowadził dokładną analizę wpływu prędkości fali elektromagnetycznej na konwersję czasowo-głębokościową radargramów, a w efekcie na poprawne pozycjonowanie głębokościowe anomalii. Takie analizy, jak na razie, to rzadkość w pracach i artykułach nt. metody georadarowej w Polsce; w praktyce przemysłowej wciąż pokutuje myślenie, że wystarczającym jest przyjęcie tabelarycznej prędkości średniej dla całego badanego rejonu. Dokładna analiza prędkościowa, pozwoliła Autorowi przeanalizować różne scenariusze interpretacyjne, co zaowocowało przeprowadzeniem poprawnej interpretacji radargramów w korelacji z danymi otworowymi. W przyszłości, podczas przygotowania pracy do druku, warto byłoby poszerzyć informacje zawarte w Rozdziale 5.3.4 o opisy teoretyczne i analizy praktyczne różnych technik migracyjnych.

Autor podkreśla w pracy bardzo ważny aspekt, iż w celu poprawnej interpretacji, badania geofizyczne (m.in. georadarowe) należy zawsze korelować z informacjami otworowymi (geologicznymi, geotechnicznymi) lub z informacjami z wkopów (budowlanych, archeologicznych). Niestety taka praktyka, jak na razie, nie jest standardem w badaniach GPR.

**Rozdział 3.3. „Procedury przetwarzania danych” jest najslabszą częścią rozprawy doktorskiej i znajduje się tutaj najwięcej błędów w poprawnym tłumaczenia nazw procedur oraz opisie ich działania. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, iż Doktorant nie jest geofizykiem i prawdopodobnie nie miał zajęć z „teorii sygnałów” czy „cyfrowego przetwarzania danych pomiarowych” i in., które pozwoliłyby mu na poprawne przygotowanie tego rozdziału. Rozdział 3.3 musi zostać poddany gruntownej redakcji przed ewentualnym drukiem pracy. Całe szczęście w dalszej części pracy Autor stosował tylko kilka podstawowych procedur przetwarzania danych georadarowych więc Rozdział 3.3 nie wpłynął na jakość merytoryczną rozprawy doktorskiej.**

Niejasności pojawiające się w rozprawie doktorskiej przedstawiono poniżej w punktach i zachęca się Autora, aby odniósł się do nich podczas publicznej obrony pracy.

- 1) W pracy bardzo często pojawia się pojęcie „śladu” na rejestracjach georadarowych, czasami stosowanego wymiennie ze słowem „trasa”; w geofizyce (m.in. w metodzie GPR) najczęściej używanym i poprawnym pojęciem jest słowo „trasa”.

- 2) Strona 14 – zamieszczono zdanie z bardzo mocno brzmiącym wnioskiem, tzn.: *„Z kolei wartość amplitudy fali odbitej pozwala określić jak wygląda wzajemny stosunek przenikalności elektrycznej dwóch, graniczących ze sobą materiałów, a tym samym pomaga w ich identyfikacji”*. Współczynnik odbicia wpływający na amplitudy rejestrowanych na radargramie refleksów zależy (w dużym uproszczeniu) od kontrastu przenikalności elektrycznych dwóch, sąsiadujących ośrodków; przenikalności elektryczne z kolei są funkcjami wielu zmiennych (o czym pisze w pracy Autor), o których podczas pomiarów nie mamy zazwyczaj wiedzy; poza bardzo prostymi sytuacjami geologicznymi nie ma możliwości określenia z amplitudy refleksów jakie wartości przenikalności elektrycznych mają sąsiadujące warstwy geologiczne czy obiekty podpowierzchniowe. Powyższa uwaga tyczy się również informacji zamieszczonej na stronie 99.
- 3) Strona 20 – *„W dużej większości przypadków uzasadnione jest pominięcie wpływu współczynnika przenikalności magnetycznej na kierunek i amplitudę fali odbitej.”* Proszę o wyjaśnienia w jaki sposób  $\mu$  wpływa na kierunek i amplitudę fali odbitej.
- 4) Strona 38 – *„W pomiarach tą techniką (tj. refleksyjną) duże znaczenie ma wzajemna orientacja anten, choć w przypadku anten ekranowanych, zarówno na ich układ jak i rozmieszczenie użytkownik nie ma wpływu”*. Strona 45 – *„Jeśli antena jest ekranowana, to nie istnieje możliwość zmiany orientacji anten względem siebie oraz zmiany odległości między nimi”*. Nieprawda – różni producenci, np. MALA, IDS, Sensor&Software i in. mają w swojej ofercie anteny ekranowane, rozseparowane, co pozwala zmieniać zarówno ich orientacje jak i offset.
- 5) Strona 38 – *„W konfiguracji, gdzie obydwie anteny umieszczone są równoległe do siebie, wzrasta ich czułość”*. Nieprawda – przykłady, gdy odpowiednia orientacja anten jak również odpowiednio dobrany offset (o czym pisze Autor na stronie 49) zwiększyły zdolności detekcyjne metody GPR można znaleźć w literaturze geofizycznej, m.in. w pracach, Gołębiowskiego, Marcaka, Roberts’a, Radzevicius’a, Daniels’a czy Guy’a.
- 6) Strona 45 – *„Regułą jest, że w przypadku wątpliwości lepiej jest zastosować anteny o większym zasięgu, kosztem rozdzielczości”*. Dlaczego? Raczej w płytkich badaniach geodezyjnych prowadzonych dla celu GESUT będzie odwrotnie.
- 7) Strona 47 – *„Producenci aparatury georadarowej zalecają jednak, aby wartość dzielnika w powyższym wzorze (3.2) była jeszcze większa, wynosząca nawet piętnastokrotność częstotliwości anteny. W praktyce będzie wiązało się to ze*

*skróceniem okna czasowego i dopiero zwiększenie ilości złożeń sygnału może przywrócić założoną wartość*". Długość okna czasowego jest iloczynem ilości próbek oraz kroku próbkowania sygnały (który jest odwrotnością częstotliwości próbkowania); jeśli zwiększamy częstotliwość próbkowania, to aby zachować zakładaną długość okna należy zwiększyć ilość próbek, a nie składanie (stacking); procedura składania służy do czegoś zupełnie innego.

- 8) Strona 47 – „ ... oraz zmian wynikających z różnic pomiędzy składaniem sygnału odebranego z wysłanym (DOJACK 2012)”. Niejasny sens tej części zdania.
- 9) Strona 58 i inne strony - Proszę o wyjaśnienie powiązania techniki „adaptacji hiperbol dyfrakcyjnych” z pojęciem „hiperbolicznej funkcji czasu” czy „funkcjami hiperbolicznymi”.
- 10) Jak uzasadnić, iż na Rys. 3.5 uzyskano w ośrodku geologicznym prędkości bliskie prędkości światła w próżni (np. 0,27 m/ns), a nawet większe od prędkości światła (np. 0,33 i 0,36 m/ns).
- 11) Dlaczego w zależności od miejsca badań stosowano dwa różne georadary, tj. (a) lotnisko – georadar Dector Duo (250-700 MHz) i (b) zbiornik wodny – georadar ProEx (500-800 MHz). Dlaczego analizę wpływu systemu GNSS na pomiary georadarowe przeprowadzono tylko dla georadaru ProEx, a analizę wpływu GPR na pomiary GNSS przeprowadzono tylko dla georadaru Detector Duo.
- 12) Strony 104-105 – „*Osady organiczne występują od m 0+135 do m 0+275 i tam też na podstawie pomiarów geodezyjnych odnotowano nierównomierne osiadanie pasa startowego.*” Na Rys 5.1 na wspomnianym metrażu widać wyniesienie terenu, a osiadanie pasa zaznacza się od ok. 500m do ok. 700m, z minimum na ok. 620m.
- 13) Na Rys. 5.4 i 5.5 powinny zostać naniesione informacje hydrogeologiczne, ponieważ obecność i rozkład wody w ośrodku ma kluczowe znaczenie w badaniach GPR.
- 14) Na Rys. 5.1 wysokości pasa startowego zmieniają się od 161,8m do 163,4m n.p.m.; na Rys. 5.4 i 5.5 wysokość n.p.m. po obu stronach pasa wynosi 132 m, a na Rys 5.7 – 5.11 wysokość n.p.m. wynosi 127m. Wyjaśnienie tego problemu pojawi się w pracy dopiero pod jej koniec (Rozdział 5.3.5); informacje z tego rozdziału powinny znaleźć się wcześniej, aby czytelnik wiedział skąd wzięły się rozbieżności w wysokościach rzędu 30m.

- 15) Dlaczego na poszczególnych radargramach zarejestrowanych w tym samym miejscu pomiarowym stosowano różne skale amplitudowe, np. Rys. 5.7 ( $\pm 2910$ ), Rys. 5.8 ( $\pm 2839$ ), Rys. 5.9 ( $\pm 2271$ ), Rys. 5.10 ( $\pm 1314$ ), Rys. 5.11 ( $\pm 2366$ ). Takie podejście znacząco utrudnia poprawną analizę zmienności współczynnika odbicia. To samo dotyczy Rys. 6.5 ( $\pm 191$ ) i Rys. 6.8 ( $\pm 77$ ) .
- 16) W jaki sposób określono prędkość 0,15 m/ns podczas badań na lotnisku? Tak wysoka prędkość jest charakterystyczna dla skał i bardzo suchych gruntów, a Autor wspomina, że wyniki badań geologiczno-geotechnicznych wskazywały, iż poziom wód gruntowych stabilizował się na głębokości 1,6-2,3m ( $\pm 0,5$ m), więc znacząca część badanego gruntu była zawodniona i prędkość powinna drastycznie spadać.
- 17) Na Rys. 5.7-5.11 należałoby nanieść przebiegi warstw geologicznych i zwierciadło wód gruntowych wyznaczone z wierceń, co pozwoliłoby na pewniejszą interpretację radargramów; warto byłoby również zaznaczyć na rysunkach, gdzie zalegał śnieg podczas badań georadarowych.
- 18) Rys. 5.7-5.11 – wyznaczenie przebiegu „warstwy A” i „Warstwy D” z radargramów wydaje się być bardzo trudne i jest obarczone bardzo dużą dozą niepewności interpretacyjnej.
- 19) W Rozdziale 5.3.3 po przedstawieniu wniosków od (a) do (j) powinna pojawić się informacja, że w kolejnych Rozdziałach 5.3.4 i 5.3.5 pojawi się dokładna interpretacja, aby czytelnik wiedział, że przedstawione hipotezy to tylko interpretacja jakościowa i wstępna.
- 20) Rys. 5.12d i 5.13.d – znacznie słabsza jakość radargramu na Rys. 5.12d w stosunku do 5.13d wynika najprawdopodobniej z źle przeprowadzonej procedury migracyjnej w programie Reflex; technika adaptacji hiperbol dyfrakcyjnych pozwala przygotować dokładną mapę zmienności prędkości, a na podstawie takiej mapy można bardzo dobrze migrować sekcję i uzyskać wynik podobny do Rys. 5.12d. Oczywiście prawdą jest, że najlepiej algorytmy migracyjne radzą sobie z układem horyzontalnie-warstwowanym, a im bardziej skomplikowana budowa geologiczna i im większa zmienność prędkości tym migracja może wprowadzać mocniejsze zniekształcenia rejestracji.
- 21) Strona 132 – „Proces integracji danych GPR i GNSS wydaje się być niezbędnym do tego, aby ewentualne wyniki (badań georadarowych) móc rozpatrywać w kategorii

*informacji przestrzennych.*” To zdanie jest zbyt daleko posuniętym wnioskiem; aby uzyskać informację przestrzenną (model 3D ośrodka geologicznego) nie ma potrzeby stosowania systemu GNSS; wizualizacje 3D przygotowane na podstawie „klasycznych” pomiarów geodezyjnych stosowano w geofizyce na długo przed upowszechnieniem się systemów GNSS.

- 22) Rozdział 6.1 - w jaki sposób różnica pikowania to o 3,3 ns powoduje zmianę głębokości anomalii o 40cm (przy prędkości 12cm/ns)?
- 23) Na Rys. 6.4 powinno zostać zaznaczone położenie rury – przecież jej lokalizacja jest celem badań. W którym miejscu punkty od GPR-1c do GPR-8c z Rys. 6.6 lokują się na Rys. 6.4.
- 24) Które z 22 profili pokazanych na Rys. 6.4 to 8 radargramów pokazanych na Rys. 6.5 ?
- 25) Rys. 6.5 – jeśli szczyt hiperboli od rury znajduje się na 26ns to czym spowodowane były wysokoamplitudowe rejestracje w początkowych fragmentach profili.
- 26) Jeżeli amplitudy na Rys. 6.5 zmieniają się w zakresie  $\pm 191$  to dlaczego w Tabeli 6.1 amplitudy zmieniają się od 224 do 351 ?
- 27) Czy zgodnie z Rozporządzeniem, dokładność lokalizacji sieci uzbrojenia terenu nie mniejsza niż 0,3m oznacza na Rys. 6.6  $\pm 0,3m$  od rzeczywistej pozycji rury czy też  $\pm 0,15m$  (czyli w sumie 0,3m) ?
- 28) Wniosek „c” na stronie 162, brzmi: *„Na skutek zmian temperatury wody oraz objętości związków chemicznych i organicznych wraz ze wzrostem głębokości, może zmieniać się średnia prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej.”* Jest to bardzo mocny wniosek; należałoby go poprzeć jakimiś danymi Autora lub z danymi literaturowymi, gdzie pokazana byłaby silna zmiana wartości przenikalności elektrycznej (a więc i prędkości fali elektromagnetycznej) w wodzie jeziornej (słodkiej) w zależności od temperatury i stężenia jonów.
- 29) Rys. 6.9 duże spadki dna obserwujemy raczej w części N i S stawu, natomiast po stronie E i W są to spadki łagodne.
- 30) Nie do końca mogę się zgodzić z jednym z wniosków Autora, tzn. *„Podsumowując uzyskane wyniki można dojść do wniosków, że technologia pomiarów GPR/GNSS gwarantuje wiarygodną dokładność wyznaczenia głębokości przebiegu granic warstw ośrodków materiałowych tylko w przypadku, gdy ich przebieg zbliżony jest do przebiegu nawierzchni po której prowadzony jest pomiar (np. warstwy dróg).*



***W przeciwnym wypadku błędy wyznaczenia grubości mogą być zbyt duże i prowadzić do błędnych interpretacji.***” To czy przebieg granic geologicznych będzie zbliżony do ukształtowania powierzchni terenu czy też nie ma oczywiście pewien wpływ na interpretację lecz jest to wpływ niewielki; aby móc przeprowadzić poprawną interpretację istotny jest dobór odpowiedniej techniki pomiarowej (nie zawsze technika refleksyjna będzie optymalna), ważny jest rodzaj zastosowanej aparatury GPR, odpowiednio należy dobrać zestaw procedur przetwarzania, ważne jest posiadanie dodatkowych informacji o badanym ośrodku (najczęściej z wierceń) oraz co jest kluczowe – należy przeprowadzić dokładne rozpoznanie prędkościowe ośrodka oraz zastosować optymalną technikę migracyjną.

Stronę redakcyjną rozprawy doktorskiej (tzn. strukturę pracy, jakość materiałów graficznych, opracowanie figur i tabel) można uznać ogólnie za poprawną. Poniżej zamieszczono główne uwagi techniczne do Autora, które należałoby uwzględnić podczas przygotowania rozprawy doktorskiej do druku. Ponieważ wypunktowane uwagi nie są uwagami merytorycznymi, nie ma potrzeby odnoszenia się do nich podczas publicznej obrony pracy.

- 1) Strona 5 - powinno być: „ ... w zagadnieniach związanych z inżynierią cywilną ...”.
- 2) Strona 9 – dziwnie brzmi forma: „... przekroje będące wynikiem pomiarów georadarowych ... są zbiorem zarejestrowanych odpowiedzi materiałów podpowierzchniowych ...”.
- 3) Strona 9 – mówimy „równanie konstytutywne” a nie „równanie konstytuujące”.
- 4) Strona 10 – czy równania 1.1-1.4 opisują ośrodek jednorodny czy heterogeniczny ?
- 5) Strona 10 – równanie 1.4 to prawo Gaussa dla magnetyzmu.
- 6) Strona 10 – „ ... wektory  $E, H, D, B, J$  ...” powinny być opisane symbolami wektorów.
- 7) Cała praca – w metodzie georadarowej (i w elektromagnetyzmie ogólnie) symbol  $\sigma$  wyrażany w [S/m] oznacza elektryczną przewodność właściwą.
- 8) Strona 12 – zdanie: „ ... dla większości skał tworzących skorupę ziemską zwykła się przyjmować, że  $\mu_r=1$ .” jest zdaniem błędnym. Na zmienności przenikalności magnetycznej (lub wyliczanej z niej wartości podatności magnetycznej) bazuje magnetometria; z powyższego zdania wynika, że nie można przeprowadzić interpretacji w magnetometrii ponieważ wszystkie skały mają taką samą wartość względnej przenikalności magnetycznej.
- 9) Strona 13 – piasek na plaży nie jest mieszaniną ziaren gleby lecz ziaren kwarcu ( $\text{SiO}_2$ ).

- 10) Strona 18 – dziwnie stylistyczne brzmi zwrot „... rozróżnialności odległościowej ...”
- 11) Strona 20, podrozdział 1.3.1 – jest  $\epsilon$ , a powinno być  $\epsilon_r$ .
- 12) Strona 21 – „... gdzie  $A$  to wartość amplitudy fali bezpośredniej,  $G$  to wartość amplitudy fali powierzchniowej, ...”. W metodzie GPR używamy raczej pojęć: bezpośrednia fala powietrzna (Direct Air Wave) oraz bezpośrednia fala gruntowa (Direct Ground Wave); obie te fale są falami bezpośrednimi (nieodbitymi, nierefragowanymi), dlatego pojęcie „fala bezpośrednia” nie jest jednoznaczne; pojęcie „fala powierzchniowa” stosowane jest raczej w sejsmice.
- 13) Strona 22, podrozdział 1.3.2 – jest „... na rysunku 1.1c ...” powinno być: 1.2c.
- 14) Strona 22 – mówimy raczej „prędkość propagacji fali” a nie „szybkość”.
- 15) Strona 23 – mówimy raczej „fala nie przechodzi do ośrodka” a nie „nie przedostaje się”
- 16) W kilku miejscach w pracy – raczej używamy pojęcia „badany ośrodek geologiczny” a nie „mierzony ośrodek geologiczny”.
- 17) Strona 28 – urządzenie do pomiaru odległości nie zależy od tego czy anteny są ekranowane czy też nie; np. w georadarach firmy MALA można używać odometru nitkowego (tzw. chip chain) zarówno w antenach ekranowanych jak i nieekranowanych; to samo dotyczy się kółka pomiarowego; przy okazji – pomiar odległości (głębokości) w antenach otworowych nie odbywa się z użyciem nici.
- 18) Strona 28 – użyto dziwnego określenia odometru nitkowego w formie „kółka całkującego”.
- 19) We wzorze 2.7 powinno być  $\lambda/4$ .
- 20) Strona 36 – „W przypadku gdy mierzony ośrodek zbudowany jest z substancji gliniastych lub ilastych, lokalizowanie obiektów w nim położonych będzie niemożliwe”. Dlaczego? Przecież sucha glina i łyły mają podobne wartości tłumienia do większości skał czy mokrych piasków; prawdą jest, że w mokrych glinach współczynnik tłumienia jest bardzo wysoki.
- 21) Strona 41 – rysunek z profilami w tym samym kierunku powinien mieć sygnaturę „a” natomiast profile naprzemienne sygnaturę „b” – wtedy opis „... w przypadku pomiarów w dwóch kierunkach (rysunek 3.1b) ...” będzie poprawny.
- 22) Strona 43, podrozdział 3.1.2 – jest „Profilowanie WAAR ...” powinno być „Profilowanie WARR i CMP ...”
- 23) Strona 44 – Prześwietlanie (tomografię) stosuje się przede wszystkim do prześwietlania między otworowego lub w układzie „otwór – powierzchnia”, a znacznie rzadziej

(przynajmniej obecnie) do badania ścian i stropów budynków, prześwietlania filarów i pni drzew.

- 24) Strona 44 – „*W innym podejściu do tej techniki, obie anteny przesuwane są jednocześnie, ale wiąże się to z zastosowaniem zaawansowanych aplikacji interpretacyjnych.*” Nieprawda – opisany schemat pomiarowy (tzw. fast tomography) stosuje się zazwyczaj przed rozpoczęciem bardzo czasochłonnych, pracochłonnych i drogich standardowych badań tomograficznych, aby szybko ocenić jakość rejestracji; technika ta pozwala szybko wypikować pierwsze wstąpienia (tj. czasy i amplitudy) i bez stosowania zaawansowanych programów z algorytmami inwersyjnymi ocenić zmienność prędkości i tłumienia, a w efekcie podjąć decyzję czy jest sens rozpocząć standardowe badania tomograficzne, które na etapie przetwarzania danych wymagają żmudnej analizy tras i stosowania algorytmów inwersyjnych.
- 25) Strona 44 – „*W wyniku opracowania można otrzymać rozkład wartości prędkości fali elektromagnetycznej w badanym obiekcie*”. Wyniki badań tomograficznych pozwalają nie tylko na uzyskanie mapy (czy wizualizacji 3D) zmienności prędkości ale, co jest również wartościowe, pozwalają zwizualizować w 2D/3D zmienność tłumienia w badanym ośrodku. Więcej szczegółów na ten temat można znaleźć w pracy T. Gołębiowskiego, pt. „*Zastosowanie metody georadarowej do detekcji i monitoringu obiektów o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym*”.
- 26) Strona 45 – „*Aparatura rejestruje czas przejścia fali bezpośrednio, a istotne z geologicznego punktu widzenia informacje można uzyskać poprzez analizę amplitudy pierwszych wystąpień fali nadawanej*”. Zdanie niepoprawne – należy zapoznać się z teorią tomografii georadarowej.
- 27) Strona 50 – nie mówi się „procesowanie danych” tylko „przetwarzanie danych”. Strona 78 – nie „funkcje procesujące” lecz „funkcje lub procedury przetwarzania”.
- 28) Strona 52 – polskie opisy procedur na Rys. 3.3 są w większości niepoprawne.
- 29) Strona 52 – podpis pod Rys. 3.3: „... *dla anten bistatycznych* ...”, a czy dla anten monostatycznych obowiązuje inny standard postępowania ?
- 30) Strona 54 – „... *odchylenia w szczelinie powietrznej anteny* ...” co to oznacza ?
- 31) Strona 63 – algorytmy migracyjne w sejsmice czy metodzie GPR nie służą do filtrowania sygnałów.
- 32) Strona 81 – „... *pierwszy przedstawiał zarejestrowaną falę w jej początkowym okresie* ... „ - okres funkcji/sygnału oznacza coś innego; lepiej będzie napisać „w początkowej części okna czasowego” lub „w przedziale czasu od .. do ...”

- 33) Strona 87 – nie używa się zwrotu „filtr średnioprzepustowy”.
- 34) Strona 88, drugi akapit – powinno być: „... (rysunek 4.8) ...”.
- 35) Rys. 4.10 – na osiach pionowych powinno być „t [ns]” a nie „Y-Distance”.
- 36) Strona 100 – „...zwiększenie długości fali powoduje zwiększenie rozdzielczości pionowej i poziomej anteny ...” Odwrotnie, tzn. zmniejszenie długości fali (a więc zwiększenie częstotliwości anteny) powoduje wzrost rozdzielczości.
- 37) Rys. 5.1a – brak skali poziomej; oba rysunki („a” i „b”) powinny zostać przygotowane w tej samej skali.
- 38) Rys. 5.3 – brak skali poziomej.
- 39) Rysunek 5.4 i 5.5 – na osi poziomej lepiej byłoby zastosować skalę odległości określoną w metrażu identycznym jak na Rys. 5.1 i 5.3 (gdzie należy nanieść skalę), a nie w formie odległości pomiędzy otworami; takie podejście znacznie ułatwiłoby porównywanie informacji zamieszczonych na Rys. 5.1, 5.3, 5.4 i 5.5
- 40) Rysunek 5.6 – Detector Duo posiada dwie anteny więc warto byłoby w podpisie rysunku umieścić informacje, którą anteną zarejestrowano pokazany radargram.
- 41) Na stronach 109-110 oraz na Rys. 5.7-5.11 zamiast zwrotu ”Warstwa” bardziej poprawne będzie użycie określenia „spąg warstwy” lub „granica geologiczna”.
- 42) Strona 113 i inne strony – w geologii używamy pojęcia „miąższość warstwy” a nie „grubość warstwy”.
- 43) Strona 118 – pierwszy powinien pojawić się akapit zaczynający się od „*Druga metoda jest z kolei ...*” ponieważ Autor odwołuje się w nim do Rys. 5.12; dopiero po nim powinien być umieszczony akapit zaczynający się „*Pierwsza metoda oparta ...*” gdzie autor odwołuje się do Rys. 5.13 i 5.14.
- 44) Strona 118 – nie mówi się „... *wpasowanie funkcji hiperbolicznej..*” lecz „*zastosowanie procedury adaptacji hiperbol dyfrakcyjnych*”
- 45) Rys. 5.18-5.21 – w podpisie powinny chyba być GPR-5 a nie GPR-2 ?
- 46) W geofizyce przyjmujemy, że dla układu kartezjańskiego współrzędne X i Y to współrzędne horyzontalne, a współrzędna Z to wysokość; zamiast Z stosujemy również oznaczenie „d” lub „h” dla określenia głębokości; dlatego na Rys.5.24a na osi pionowej powinno być Z a nie Y. Na Rys. 5.24b brak opisu osi głębokościowej. Ta sama uwaga tyczy fragmentu tekstu na stronie 132 „*Proces digitalizacji polega na operacji przekształcenia wyników pomiarów georadarowych do formy cyfrowych współrzędnych X, Y.*” Raczej X-Z.
- 47) Na Rys. 5.23 i 5.33 należy umieścić skalę poziomą.

- 48) Rys. 5.26 – pikowanie amplitud to nie wektoryzacja.
- 49) Rys. 5.27 – w podpisie powinno być „...nawierzchni...”.
- 50) Strona 139 – „*Transformacja danych georadarowych z formy jednowymiarowego radargramu ...*” Radargram to wizualizacja 2D, tj. funkcja dwóch zmiennych, gdzie amplitudy są funkcjami miejsca, tj.  $A(x,t)$  lub po konwersji czasowo-głębokościowej  $A(x,d)$ .
- 51) Rys. 6.2 – brak skali pionowej (czas) i poziomej (amplituda).
- 52) Rys. 6.3 – na rysunku należy zaznaczyć co oznaczają czerwone linie (różne położenie rury?) i co oznacza prostokąt ze szrafurą (дно? osady?).
- 53) Rys. 6.5 – brak skali poziomej.
- 54) W Tabeli 6.3 powinno znaleźć się (jak w innych tabelach) oszacowanie błędu, w formie wartości średniej dla różnicy i odchylenie standardowe.
- 55) We wzorze 6.2 zamiast  $m_d$  powinno być chyba  $m_{pod}$
- 56) Rys. 6.8 nieczytelne opisy liczbowe osi.

Przedstawione w recenzji pewne zastrzeżenia merytoryczne oraz liczne mankamenty techniczne rozprawy nie umniejszają znacząco jej wartości merytorycznej i naukowej. Rozprawa doktorska spełnia trzy główne założenia Ustawy, tzn.:

- 1) stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego postawionego przez Autora pracy,
- 2) Doktorant wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu metody georadarowej i systemów GNSS oraz
- 3) udowodnił umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Tanajewskiego pt. „*Badanie przydatności zintegrowanych pomiarów georadarowych i GNSS do geodezyjnej inwentaryzacji obiektów i struktur podpowierzchniowych*” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” w związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Tomisław Gołchowski