

Załącznik 2

Autoreferat przedstawiający opis osiągnięcia naukowego

dr inż. Łukasz Ortyl

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geodezji inżynierskiej i Budownictwa

Spis Treści

1.	Imię i nazwisko	3
2.	Wykształcenie	3
3.	Zatrudnienie i najważniejsze dokonania naukowe	3
4.	Wykaz osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789)	5
5.	Geneza cyklu publikacji	10
6.	Sformułowanie problematyki naukowej.....	12
7.	Omówienie wyników badań własnych.....	25
8.	Podsumowanie.....	67
9.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	72
10.	Bibliografia	75

1. Imię i nazwisko

Łukasz Ortyl

2. Wykształcenie

- X.1996 - I.2000 Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, studia inżynierskie I stopnia
Tytuł zawodowy inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia uzyskany na podstawie egzaminu inżynierskiego z części teoretycznej i praktycznej.
- II.2000-VI.2001 Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, studia magisterskie II stopnia
Tytuł zawodowy magistra inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia specjalność: geoinformatyka i teledetekcja, praca magisterska pod tytułem „Termograficzna inwentaryzacja i system informacji terenowej dla sieci ciepłowniczej SSE Mielec” opiekun naukowy dr inż. Alina Wróbel. Pracę otrzymała II miejsce w konkursie na najlepszych prac dyplomową o charakterze technologicznym w zakresie geodezji i kartografii. Nagrodę ufundowało Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno – Kartograficzne w Krakowie.
- X.2001-VII.2005 Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, studia doktoranckie
Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia. Pracę doktorską pt. „Badanie przydatności metody georadarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów podpowierzchniowych” obroniona z wyróżnieniem w dniu 01.02.2007. Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Gocał (Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie); recenzenci: dr hab. inż. Bogdan Wolski prof. PK (Politechnika Krakowska w Krakowie), dr hab. inż. Krystian Pyka, (Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie). Autor za powyższą pracę został uhonorowany indywidualną Nagrodą Rektora AGH za osiągnięcia naukowe

3. Zatrudnienie i najważniejsze dokonania naukowe

- XI.2001 - III.2002 Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno – Kartograficzne w Krakowie, praca na stanowisku geodety w pracowni fotogrametrii
- IV.2002 - VII.2003 Biuro Geodezyjno – Projektowe WISA, praca na stanowisku geodety w zakresie podstawowego asortymentu usług geodezyjnych
- VIII.2003 - XII.2004 DEPHOS sp. z o. o. praca na stanowisku geodety oraz kierownika pracowni fotogrametrii naziemnej w zakresie realizacji inwentaryzacji

i dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych, przemysłowych i inżynierskich metodą fotogrametrii cyfrowej i naziemnego skaningu laserowego.

III.2007 – aktualnie Akademia Górniczo - Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
praca na stanowisku adiunkta w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa

- Autorstwo lub współautorstwo 58 publikacji, w tym 6 monografii i 2 podręczników.
- Wykonawca 10 grantów na AGH i PAN wyróżniony 5 zespołowymi nagrodami Rektora AGH za osiągnięcia naukowe.
- Wykonawca 30 prac naukowo - badawczych i zleceń dla przemysłu.
- Kierownik na AGH grantu badawczego finansowanego przez NCBiR i GDDKiA realizowanego w ramach I konkursu Wspólnego Przedsięwzięcia RID (Rozwój Innowacji Drogowych) „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”.
- Współtwórca oryginalnych przedmiotów fakultatywnych i studium podyplomowego BIM.
- Inicjator współpracy AGH i Leica Geosystems Polska w zakresie radarowych metod pomiarowych w geodezji.

4. Wykaz osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789)

Moim osiągnięciem naukowym jest cykl powiązanych tematycznie publikacji, zatytułowany „*Teledetekcyjne techniki radarowe jako narzędzia geodezyjnej inwentaryzacji stanu obiektów budowlanych i ich otoczenia*”. W cyklu przedstawiono różne obszary wykorzystania radarowych technik pomiarowych i związane z nimi procedury obliczeniowe w zakresie badania stanu i określania geometrii obiektów naturalnych i budowlanych.

Publikacje przedstawione przeze mnie jako osiągnięcie naukowe prezentują wyniki i analizę badań realizowanych z użyciem radaru do penetracji gruntów oraz naziemnego radaru interferometrycznego. Są to techniki bezinwazyjne umożliwiające inspekcje o charakterze metrycznym. Przedstawiony cykl ukazuje spojrzenie na wiele zagadnień związanych z metodami radarowymi poprzez pryzmat geodezji inżynierskiej, co ma charakter pionierski w tej specjalności. Jest to wynik 19 lat moich doświadczeń i badań w zakresie stosowania metod radarowych w ścisłym powiązaniu z problematyką geodezji inżyniersko-przemysłowej. Metody radarowe wzbogacają w sposób istotny spektrum narzędzi umożliwiających inwentaryzację geodezyjną w obszarze szeroko pojętego budownictwa – od geotechniki, przez geomechanikę, po analizę stanu konstrukcji. Zakres moich badań obejmuje zagadnienia rozpoznania podłoża, inwentaryzacji wykonawczej i powykonawczej oraz utrzymania obiektów. Szerokie możliwości technik radarowych, ujęte w niniejszym zbiorze, zostały zobrazowane w moich publikacjach, również tych niewłączonych do cyklu. Stosowanie metod radarowych wymagało od autora ciągłego poszerzania wiedzy z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz przywołanych obszarach nauk technicznych. Efektem jest współpraca z innymi jednostkami naukowymi i prowadzącymi działalność gospodarczą, co potwierdzają współautorskie publikacje.

Ponieważ przedstawiony tytuł osiągnięcia obejmuje szeroki obszar problemowy i odnosi się do cyklu publikacji w liczbie 14 pozycji, należy mieć na uwadze ich powiązanie z całościową działalnością naukową autora. W okresie mojej pracy na AGH byłem wykonawcą w 10 projektach badawczych finansowanych przez KBN i MNiSW, które w większości związane były z metodami radarowymi. Znajomość zagadnień georadarowych powiązanych z wiedzą geodezyjną skutkowało tym, iż byłem jednym z inicjatorów zawiązania konsorcjum naukowego w składzie: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Akademia Górniczo-Hutnicza (trzy wydziały), Politechnika Warszawska. Konsorcjum wygrało w 2015 r. konkurs na realizację projektu naukowo-wdrożeniowego, finansowanego przez NCBiR i GDDKiA w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID (Rozwój Innowacji Drogowych) pod tytułem „*Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie*”. Projekt realizowany był w latach 2016-2018. Pełniłem w nim funkcję kierownika projektu na AGH. Główne zadania AGH obejmowały zagadnienie wspomagania procesu rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie poprzez zastosowanie geodezyjnych, teledetekcyjnych oraz geofizycznych metod i technik pomiarowych, implementację rozwiązań GIS i BIM, monitoring powierzchniowy i wgłębny, a także ocenę stateczności skarp i zboczy. Oprócz kierowania całością zobowiązań AGH wynikających z harmonogramu i warunków projektu, moje zadania to także koordynacja działań i merytoryczne prace w ramach zespołów geodetów i geofizyków. Zespoły te odpowiadały za zagadnienia związane ze wsparciem procesu prawidłowego wykonywania i dokumentowania badań podłoża gruntowego w drogownictwie z zastosowaniem szerokiego zakresu metod geodezyjnych i wybranych geofizycznych

(georadarowej i elektrooporowej). Efektem rzeczowym projektu i pracy zespołów wchodzących w skład konsorcjum są „Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego”. Zapisy wytycznych są obecnie na etapie wdrażania przez GDDKiA, a całość będzie w najbliższym czasie przedmiotem publikacji o charakterze monografii.

Pozostając w temacie praktyczno-wdrożeniowym mojej działalności, podkreślam fakt, że nabyta przeze mnie w ramach działalności naukowej wiedza na temat metod radarowych oraz wypracowane doświadczenie istotnie wpłynęły na możliwość realizacji większości z 30 prac naukowo-badawczych i zleconych z wolnego rynku, spośród których 20 zostało wykonanych pod moim kierownictwem. W ramach tej działalności opracowano współautorskie lub autorskie niepublikowane raporty dokumentujące wyniki badań wraz z ich analizą i interpretacją. Na szczególną uwagę zasługuje kierowanie w latach 2015-2017 zleceniem badawczym pt. „Wykonanie pomiarów geodezyjnych z wykorzystaniem skanera radarowego SAR wraz z ich analizą i opracowaniem oraz walidacja uzyskanych wyników przez zastosowanie geodezyjnych pomiarów kontrolnych na wale eksperymentalnym zlokalizowanym na działce nr 796 w Czernichowie w ramach projektu badawczego PBS1/B9/18/2013 (nr 180535) pt. Badania w zakresie opracowania kompleksowego systemu monitorowania stanu statycznego i dynamicznego ziemnych obwałowań przeciwpowodziowych w trybie ciągłym, z możliwością symulacji zachodzących zmian strukturalnych oraz szacowaniem ryzyka ich uszkodzenia (ISMOP), 2014-2017”. Zadanie badawcze zlecone zespołowi Katedry Geodezji Inżynieryjnej i Budownictwa obejmuje jedyny w Polsce długookresowy pomiar budowli ziemnej, jaką jest wał przeciwpowodziowy, który był poddawany w trakcie prowadzonych badań wielokrotnym wyłączeniom przez symulowane fale powodziowe. Ponadto w 2018 r. zainicjowałem współpracę AGH i przedstawiciela grupy Hexagon, jakim jest Leica Geosystems Polska, na rzecz wdrażania radarowych metod pomiarowych w geodezji. Wspólnie czynimy wysiłki na rzecz promocji technologii poprzez działania badawcze i szkoleniowe.

Moja działalność naukowa i wdrożeniowa zaowocowała wkładem do jedynego w języku polskim podręcznika z zakresu metod georadarowych pt. „Zarys metody georadarowej”, wydanego w 2011 r., a napisanego przez trzech autorów: radioelektronika, geofizyka i mnie – geodetę. W tym samym roku ukazał się podręcznik „Geodezja inżynieryjno-przemysłowa. Tom III”, w którym jako współautor opracowałem rozdział „Pomiary inwentaryzacyjne sieci uzbrojenia terenu”. Jest to jedyny do niedawna podręcznik ujmujący współczesne aspekty tego zagadnienia. Tematyka naziemnej interferometrii radarowej jest przedmiotem 250-stronicowej angielskojęzycznej monografii „Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry” z 2013 r., której jestem współautorem oraz koordynatorem procesu wydawniczego. Wkrótce tematyka ta zyska również polskojęzyczny opis w podręczniku „Geodezja inżynieryjno-przemysłowa. Tom IV”, w 100-stronicowym rozdziale, którego jestem współautorem. Publikacja ta jest w procesie wydawniczym po dwóch pozytywnych recenzjach. Wymienione pozycje publikacyjne cyklu oraz przywołane podręczniki przyczyniają się do upubliczniania wiedzy, co jest istotnym obszarem mojej działalności naukowej.

Podsumowując, w zaprezentowanych pracach cyklu, ale również innych publikacjach będących wizytówką działalności naukowej autora, nie skupiono się jedynie na narzędziach pomiarowych umożliwiających stosowanie przywołanych technik radarowych. Istotą tych publikacji jest kwestia metodyki pomiarów, a w szczególności dobór optymalnej konfiguracji i parametrów pomiarowych, analiza uzyskanych wyników, a także ocena ich przydatności i

ograniczeń w zakresie problemu inwentaryzacji obiektów budowlanych oraz form naturalnych. Ważnym aspektem jest również przetwarzanie, modelowanie i interpretacja danych radarowych, które są kluczowe w poprawnym wykorzystaniu możliwości naziemnych metod teledetekcyjnych.

Przeprowadzone eksperymenty i sformułowane na ich podstawie wnioski dostarczają odpowiedzi na wiele fundamentalnych i dogłębnych pytań, które pojawiają się wśród osób wykonujących badania oraz prace z zastosowaniem radarowych technik pomiarowych.

Zdaniem autora oryginalny charakter posiadają następujące aspekty cyklu publikacji: forma realizacji pomiarów, metodyka i algorytmy ich przetwarzania, klucze interpretacyjne oraz jakościowa, ilościowa i geometryczna analiza wyników. Cykl wnosi istotny przyczynek naukowy do dyscypliny geodezja i kartografia w części dotyczącej inwentaryzacyjnych pomiarów geodezyjnych realizowanych na potrzeby inżynierii lądowej. Co więcej, według wiedzy autora znaczna ilość wyciągniętych wniosków i zaproponowanych rozwiązań ma charakter użytkowy i jest istotna z punktu widzenia innych obszarów nauki, takich jak geologia inżynierska, geofizyka czy mechanika konstrukcji.

Poniżej przedstawiono wykaz publikacji i monografii stanowiących osiągnięcie naukowe, wraz z niezbędnymi danymi źródłowymi.

1. **Ł. ORTYL**, Rafał KOCIERZ: *Automation of the integration process of georadar and geodetic data acquired with the integrated GPR-GPS system or GPR-TCA type tachymeter*. Geodesy, photogrammetry and monitoring of environment. 43, s. 113–124, ISSN 0079-3299, 2007.

Punktacja: 4, Udział w opracowaniu: 80%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie korekt geometrycznych w postaci zależności matematycznych dla danych georadarowych pozycjonowanych systemami geodezyjnymi, przygotowanie algorytmów i schematów blokowych oprogramowania do korekt geometrycznych danych GPR-GPS, GPR-TCA, opracowanie projektu badań weryfikujących poprawność funkcjonowania kodu, ich wykonanie i przetworzenie, opracowanie wyników i ocena statystyczna

2. **Ł. ORTYL**: *Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową*. Przegląd Geologiczny. 67, s. 252–269, SSN 0033-2151, 2019.

Punktacja: 12, Czasopismo z LF, Udział w opracowaniu: 100%

3. Jerzy KARCZEWSKI, **Łukasz ORTYL**, Ewelina MAZURKIEWICZ: *Ocena wpływu wybranych parametrów profilowań georadarowych w badaniach podłoża gruntowego dla potrzeb budownictwa na przykładzie zrębu Zakrzówka*. Przegląd Geologiczny. vol. 65 nr 10/2, s. 796–802 s. SSN 0033-2151, 2017.

Punktacja: 12, Czasopismo z LF, Udział w opracowaniu: 33%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie koncepcji badań, analiza i przetworzenie części zbioru profili georadarowych w zakresie szerszym niż podano w publikacji, analiza i opracowanie danych wybranych do publikacji georadarowych w tym niezależna ocena statystyczna, Interpretacja wyników

4. **Ł. ORTYL**, J. KARCZEWSKI, E. MAZURKIEWICZ: *Importance of selecting parameters of georadar profiles in karst area*. 17th international multidisciplinary scientific geoconference: science and technologies in geology, exploration and mining: 29 June–

5 July, 2017, Albena, Bulgaria, Conference proceedings. vol. 17, s. 173-180, ISBN: 978-619-7408-00-3, 2017.

Punktacja: 2.5, oczekuje na rejestrację w bazie Web of Science, Udział w opracowaniu: 34%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie koncepcji badań, analiza i przetworzenie części zbioru profili georadarowych w zakresie szerszym niż podano w publikacji, analiza i opracowanie danych wybranych do publikacji georadarowych w tym niezależna ocena statystyczna, interpretacja wyników

5. **Ł. ORTYL**: *Assessing of the effect of selected parameters of GPR surveying in diagnosis of the condition of road pavement structure*. Measurement, Automation, Monitoring. vol. 61 no. 5, s. 140-147, ISSN 2450-2855, 2015.

Punktacja: 11, Udział w opracowaniu: 100%

6. P. OWERKO, **Ł. ORTYL**: *GPR identification of prestressing tendons in areas with high density of ordinary reinforcement*.: GeoConference on Informatics, geoinformatics and remote sensing, Conference proceedings. vol. 2, s. 771-778, ISBN: 978-954-91818-8-3, 2013

Punktacja: 10, Baza Web of Science, Udział w opracowaniu: 50%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie koncepcji georadarowych badań terenowych, kierowanie i realizacja georadarowych badań terenowych, opracowanie danych georadarowych w zakresie ich filtracji w dziedzinie czasu i częstotliwości, interpretacja geometryczna treści echogramów

7. P. Owerko, **Ł. ORTYL**, M. Salamak: *Identification of prestressing tendons using ground penetrating radar in particular the anchorage zone*. Concrete Structures in Urban Areas: The 9th Central European Congress on Concrete Engineering. s. 250-253, ISBN: 978-83-7125-229-7, 2013

Punktacja: brak, Udział w opracowaniu: 40%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie koncepcji georadarowych badań terenowych, kierowanie i realizacja georadarowych badań terenowych, opracowanie danych georadarowych w zakresie ich filtracji w dziedzinie czasu i częstotliwości, interpretacja geometryczna treści echogramów

8. P. Owerko, **Ł. ORTYL**, M. Salamak: *Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar method*. Measurement, Automation, Monitoring, vol. 61 no. 3, s. 76-80, ISSN 2450-2855, 2015.

Punktacja: 11, Udział w opracowaniu: 45%

Zakres merytoryczny udziału: opracowanie koncepcji georadarowych badań terenowych, kierowanie i realizacja georadarowych badań terenowych, koncepcja zastosowania metodyki modelowanie pola falowego FDTD dla rozwiązania problemu badawczego, opracowanie danych georadarowych w zakresie ich filtracji w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz modelowanie FDTD, interpretacja geometryczna i konfrontacja treści echogramów z modelowaniem FDTD i pomiarów rzeczywistych, stworzenie mapy rozkładu pustek dla modelowania MES

9. P. KOHUT, K. HOLAK, T. UHL, **Ł. ORTYL**, T. OWERKO, P. KURAS, R. KOCIERZ: *Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements*. Structural Health Monitoring. vol. 12 iss. 5-6 Special issue on Noncontact measurement technology for structural health monitoring, s. 411-429, ISSN 1475-9217, 2013.
Punktacja: 40, Czasopismo z LF, Baza Web of Science, IF = 3.206, Udział w opracowaniu: 15%
Zakres merytoryczny udziału: zaprojektowanie i realizacja systemu pomiarowego dla potrzeb eksperymentu laboratoryjnego i podstawowego, zaprojektowanie trenowego eksperymentu podstawowego, analiza i statystyczna weryfikacja eksperymentu podstawowego
10. T. OWERKO, **Ł. ORTYL**, R. KOCIERZ, P. KURAS, M. Salamak: *Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry - case study*. Bridge maintenance, safety, management, resilience and sustainability: proceedings of the sixth international conference: Stresa, Italy, 8-12 July 2012. - S. 85. - Pełny tekst na dołączonym CD-ROM-ie. - S. 181-188, ISBN 978-0-415-62124-3, 2012.
Punktacja: 10, Udział w opracowaniu: 35%
Zakres merytoryczny udziału: czynna realizacja badań terenowych wraz z koordynacją prac geodezyjnych zespołów badawczych, opracowanie danych z instrumentów klasycznych i radarowych, analiza i opracowanie danych statystycznych i dynamicznych
11. Paweł ĆWIAKAŁA, Krzysztof Deska, Rafał KOCIERZ, **Łukasz ORTYL**, Tomasz OWERKO, Edyta PUNIACH, Izabela Skrzypczak, Tomasz Świętoń Wybrane problemy geodezji inżynierskiej. monografia pod red. T. Świętoń, ISBN 978-83-60507-28-5, 2015.
Punktacja: 20, Współautor rozdziału 4, *Identyfikacja elementów sceny radarowej na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego*. Monografia w języku polskim Udział w opracowaniu: 50%
Zakres merytoryczny udziału: opis problematyki badawczej, realizator badań terenowych na obiektach wysmukłych, autor metodyki identyfikacji elementów sceny radarowej na podstawie danych TLS zakres obiektów wysmukłych
12. J. GOCAŁ, **Ł. ORTYL**, T. OWERKO, P. KURAS, R. KOCIERZ, P. ĆWIAKAŁA, E. PUNIACH, O. SUKTA, A. BAŁUT: *Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry*. Wydawnictwa AGH, ISBN: 978-83-7464-645-1, 2013,
Punktacja: 25, Współautor rozdziałów 2÷5, Autor rozdziału 8 *Surveying of static displacement and vibration of high structures*. Monografia w języku angielskim Udział w opracowaniu: 100%
13. P. KURAS, **Ł. ORTYL**, M. Kędzierski, P. Podstolak: *Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer*. Pomiary, Automatyka, Kontrola, vol. 60 nr 12, s. 1090-1095, ISSN 0032-4140. — 2014.
Punktacja: 11, Udział w opracowaniu: 50%
Zakres merytoryczny udziału: zdefiniowanie problematyki badawczej, realizacja radarowych badań terenowych, analiza i opracowanie danych radarowych, analiza profilu radarowego i wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia z danych

radarowych, analiza walidacyjna zastosowanych wszystkich metod pomiarowych, analiza statystyczna danych

14. P. KURAS, Ł. ORTYL, T. OWERKO, R. KOCIERZ, M. Kędzierski, P. Podstolak: *Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods*. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring: 30th March–1st April, FIG, IAG, TU Wien, 2016

Punktacja: brak, Udział w opracowaniu: 40%

Zakres merytoryczny udziału: zdefiniowanie problematyki badawczej, realizacja radarowych badań terenowych (komin 1), analiza i opracowanie danych radarowych, analiza profilu radarowego i wyznaczenie logarytmicznego dekrementu tłumienia z danych radarowych, analiza walidacyjna zastosowanych wszystkich metod pomiarowych, analiza statystyczna danych

Suma punktów MNiSW: 168,5

Dane bibliometryczne:

Sumaryczny Impact Factor: 3.206

Web of Science

Suma cytowań: 52

Suma cytowań w bazie bez autocytowań: 49

Indeks Hirscha: 3

Scopus

Suma cytowań: 65

Suma cytowań w bazie bez autocytowań: 56

Indeks Hirscha: 3

5. Geneza cyklu publikacji

Geodezja inżynieryjno-przemysłowa nierozzerwalnie związana jest z realizacją pomiarów ukierunkowanych na wsparcie procesów w szeroko pojętym budownictwie. Znaczący zakres działań obejmuje zagadnienia związane z inwentaryzacją geodezyjną zarówno otoczenia, jak i samej inwestycji budowlanej. Ma to miejsce na etapie projektowym, wykonawczym oraz eksploatacyjnym. We wszystkich tych etapach geodezja inżynieryjno-przemysłowa dla uzyskania optymalnego wyniku oprócz klasycznych metod i technik wielokrotnie sięga poza standardowe narzędzia i rozwiązania pomiarowo-badawcze. Jest to realizowane w myśl koncepcji profesora Lazzariniego, która już w roku 1977 wskazywała, iż w obszarze narzędzi pomiarowych geodezja musi wyjść poza tradycyjne instrumenty pomiarowe i adaptować rozwiązania instrumentalne współczesnej fizyki. Sugerowała równocześnie brak ograniczeń co do doboru i rozwoju idei konstrukcyjnych instrumentów pomiarowych, jak również sposobów pomiarów i obliczeń. Wskazywała na potrzebę uwydatniania geometrycznego charakteru uzyskiwanych rezultatów (Lazzarini i in., 1977).

W myśl tej koncepcji od roku 2000 prowadziłem pracę naukową w zakresie badania przydatności metody georadarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów podpowierzchniowych, czego efektem była obroniona w 2007 roku praca doktorska.

Zagadnienie stosowania metody georadarowej w obszarze inwentaryzacji geodezyjno-budowlanej stanu struktur naturalnych i antropogenicznych okazało się bardzo szerokie i nie wyczerpane na tyle, iż prace badawcze w tym obszarze kontynuują do dziś. Działania podjęte w doktoracie jednoznacznie wskazywały, że metoda oparta na propagacji fal radarowych w głąb ośrodka, wzbogaca w sposób istotny spektrum narzędzi umożliwiających inwentaryzację geodezyjną w obszarze szeroko pojętego budownictwa: od geotechniki, geomechaniki po analizę stanu konstrukcji. Wyniki doktoratu zainspirowały mnie do rozszerzenia obszaru moich zainteresowań naukowych tak, iż ujmował ogólny zakres metod radarowych. Po uzyskaniu stopnia doktora w roku 2007 zainicjowałem i przygotowałem merytorycznie wniosek grantu aparaturowego, który uzyskał finansowanie, następstwem czego był zakup pierwszego w Polsce naziemnego radaru interferometrycznego IBIS. Od tego momentu główny nurt badawczy obejmował kontynuację zainteresowań techniką georadarową i naziemną interferometrią radarową. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zakupiony sprzęt dał możliwość rozwoju kadry naukowej, przyczyniając się do powstania wielu prac dyplomowych, 4 doktoratów, 2 habilitacji i pozyskania trzech grantów MNiSW.

W zakresie obu radarów moje badania korespondują z obszarem geodezji, jakim jest teledetekcja, która w geodezji inżyniersko-przemysłowej została sprecyzowana przeze mnie jako teledetekcja bliskiego zasięgu. W myśl definicji teledetekcja to nauka i technologia pozyskiwania obiektywnych, wiarygodnych informacji o przedmiotach, obiektach i ich otoczeniu, a także zjawiskach fizycznych poprzez zapis, przetwarzanie, analizę, pomiar i interpretację obrazów lub zróżnicowanych rozkładów odbitej, czy też emitowanej energii elektromagnetycznej lub akustycznej – wg definicji MTFiT (ang. ISPRS) podanej przez Mularza (2004). W chwili obecnej techniki teledetekcyjne satelitarne, lotnicze i naziemne są bardzo intensywnie rozwijane. Metody radarowe jako jedne z technik teledetekcyjnych są ciągłym przedmiotem dywagacji naukowych, któremu i ja poświęciłem uwagę w swojej działalności. Techniki te oparte są o znane od lat zasady teoretyczne w zakresie podstaw fizycznych i przetwarzania sygnału. Badania prowadzone w warunkach terenowych na różnych obiektach są niezwykle istotne, gdyż weryfikują założenia teoretyczne i modelowania numeryczne. Przedmiotem badań są przede wszystkim kwestie skuteczności metod, silnie determinowane warunkami propagacji i odbicia sygnału, oraz klucze interpretacyjne pozyskiwanych danych.

Wychodząc od metody georadarowej, należy mieć na uwadze fakt, że w teledetekcji powierzchniowej stosunkowo łatwo jest wypracować klucze interpretacyjne i wykonać pomiary kalibracyjne poprzez bezpośrednie działania terenowe lub w oparciu o zobrażenia w paśmie widzialnym. W przypadku badań prowadzonych radarem do penetracji gruntów jest to znacznie trudniejsze, ponieważ analizie podlega ośrodek zakryty. W takich badaniach materiał kalibracyjny to przede wszystkim informacja z odkrywek i odwiertów, które mają swoje ograniczenia co do ilości oraz jakości i dokładności wykonania. Z punktu widzenia badań geodezyjnych, oprócz zmienności cech ośrodka, istotna jest wiarygodność geometryczna rozpoznania prowadzonego metodą georadarową. Aspekt geodezyjny wzmacnia fakt możliwości pozycjonowania pomiarów georadarowych technikami geodezyjnymi, a konwersja czasowa oparta na odpowiednim modelu prędkości propagacji fali elektromagnetycznej pozwala na rozpatrywanie geometryzacji rozpoznawanych zjawisk podpowierzchniowych. Czynnikiem geodezyjnym jest jednym z ważniejszych obszarów moich prac w zakresie metody georadarowej. Dzięki niemu wykorzystuję szerzej możliwości metody, które są w mniejszym stopniu dostrzegane i analizowane przez geofizyków. Przy takim podejściu wzrasta również jakość analiz w zakresie skuteczności i interpretacji wyników pomiarów. Zagadnienie to szeroko potraktowano w kilku publikacjach. Proponuję w nich własne algorytmy

przetwarzania niemetrycznych echogramów do postaci wektorowej albo geometrycznej chmury punktów, kreując pojęcie podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UGRS), użytecznego zarówno dla rozpoznania struktur naturalnych, jak i antropogenicznych.

W przypadku naziemnego radaru interferometrycznego mamy do czynienia ze specyficznym urządzeniem, które poprzez emisję fali elektromagnetycznej pozwala w sposób bezkontaktowy wyznaczać z submilimetrową dokładnością wartości przemieszczeń albo charakterystykę częstotliwościową drgań własnych obiektów inżynierskich. Daje to silne powiązanie z szerokim obszarem działań geodezji inżyniersko-przemysłowej w ocenie przemieszczeń, deformacji i odpowiedzi konstrukcji na obciążenia statyczne i dynamiczne. Obszar wyznaczania i metodologia geodezyjnych pomiarów częstotliwości drgań własnych obiektów inżynierskich była zagadnieniem peryferyjnym w dziedzinie geodezji. Moja działalność naukowa prowadzona we współpracy z innym pracownikami Katedry Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa oraz innych jednostek badawczych niewątpliwie wpłynęła na wzrost wiedzy i umiejętności w tym obszarze. Badania, które realizowałem, obejmowały weryfikację parametrów dokładnościowych, ale przede wszystkim zagadnienia wdrożeniowe dla różnych obiektów budowlanych, a szczególnie dla obiektów wysmukłych (wieże telekomunikacyjne i wyciągowe, kominy przemysłowe). W większości są to obiekty wiotkie, bardzo podatne na oddziaływania pochodzące od obciążeń statycznych i dynamicznych wywołanych czynnikami atmosferycznymi i mechanicznymi. Na szczególną uwagę zasługują publikacje, w których poruszana jest problematyka oceny skuteczności pracy masowych tłumików drgań (przeciwdziałanie wpływowi zjawiska wirów Karmana) oraz sposoby wyznaczania logarytmicznego dekrementu tłumienia na bazie klasycznych i radarowych pomiarów geodezyjnych.

Podsumowując, stosowanie nowych technik, metod i rozwiązań technicznych stwarza nowe możliwości poszerzania spektrum narzędzi i produktów geodezyjnych, ale wymaga ciągłych prac badawczych o charakterze weryfikującym i porządkującym metodykę pomiarową. To jest celem moich działań na polu naukowym, co ma swoje odzwierciedlenie w cyklu przedstawionych publikacji.

6. Sformułowanie problematyki naukowej

Ze względu na specyfikę pozyskiwania danych i zakresy stosowania technik radarowych, związane z tym problemy naukowe przedstawiono w dwóch obszarach.

Pierwszy obszar to inwentaryzacja geodezyjno-budowlana stanu struktur naturalnych i antropogenicznych na różnych etapach realizacji inwestycji budowlanych z zastosowaniem metody georadarowej.

Drugi obszar to ocena wpływu obciążeń statycznych i dynamicznych na zachowanie konstrukcji wybranych obiektów budowlanych z zastosowaniem naziemnej interferometrii radarowej GBSAR.

W publikacjach cyklu pojawia się wspólna część problemowa, która obejmuje obie metody, czyli:

- optymalny dobór konfiguracji i parametrów pomiarowych,
- przetwarzanie, filtrację i interpretację pomiarów radarowych,
- analizę uzyskanych wyników pod kątem oceny dokładności i wiarygodności obu metod pomiarowych.

Przedstawione aspekty zależne są od warunków i przedmiotu pomiaru, dlatego będą

częścią składową wielu publikacji w odniesieniu do konkretnych obiektów, na których prowadzono badania testowe.

Szersza problematyka w przypadku radaru do penetracji gruntów obejmuje następujące zagadnienia:

- A. Przetwarzanie wyników pomiarów georadarowych pozycjonowanych geodezyjnie w aspekcie ich poprawnej geometryzacji, w tym konwersja niemetrycznych echogramów do postaci wektorowej albo geometrycznej chmury punktów – podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UgRS).
- B. Pomiary georadarowe w rozpoznaniu podłoża gruntowego w budownictwie przetwarzanie, geometryzacja i modelowanie georadarowego pola falowego.
- C. Pomiary georadarowe w inwentaryzacji drogowych obiektów inżynierskich wraz z modelowaniem georadarowego pola falowego.

Dla badań w zakresie radaru interferometrycznego problematyka badawcza ujmuje następujące zagadnienia:

- D. Zasady i aspekty dokładnościowe prowadzenia pomiarów metodą naziemnej interferometrii radarowej.
- E. Naziemna interferometria radarowa w pomiarach odpowiedzi konstrukcji wysmukłych na obciążenia statyczne i dynamiczne.
- F. Ocena skuteczności pracy masowych tłumików drgań (przeciwdziałanie wpływom zjawiska wirów Karmana) oraz sposoby wyznaczania logarytmicznego dekrementu tłumienia na bazie klasycznych i radarowych pomiarów geodezyjnych.

Ponieważ technologia radarowa i jej specyfika jest stosunkowo nowa w obszarze geodezji, dlatego poniżej dokonano szerszego opisu definiującego podjęte zagadnienia problemowe.

A. Przetwarzanie wyników pomiarów georadarowych pozycjonowanych geodezyjnie w aspekcie ich poprawnej geometryzacji, w tym konwersja niemetrycznych echogramów do postaci wektorowej albo geometrycznej chmury punktów – podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UgRS).

Podstawowy wynik pomiarów georadarowych obejmuje sondowanie typu A-skan, czyli pojedynczą rejestrację odbicia fali nadanej w konkretnym miejscu. B-skan to profil georadarowy złożony z obserwacji typu A-skan rejestrowanych w interwałach odległości lub czasu. Kilka profilowań typu B-skan wykonanych na zadanym obszarze umożliwia generowanie tzw. C-skanów. C-skan jest „sztucznym” echogramem będącym wynikiem interpolacji informacji z sąsiadujących profilowań typu B-skan, czyli rzutem georadarowym wygenerowanym na dowolnym poziomie pod powierzchnią objętą pomiarami (Annan, 2000). W podstawowej formie dane georadarowe pozycjonowane są w oparciu o georeferencję względną, w której punktem odniesienia przestrzennego jest punkt początkowy profilu i odległość wyznaczana przez odometr, dalmierz lub za pomocą taśmy. Kierunek profilu jest wymuszony linią prostą lub jest niekontrolowany tam, gdzie wyznaczenie takiej linii jest niemożliwie. Wzajemną relację między kilkoma profilami B-skan umożliwia jedynie przygotowana i zamarkowana regularna siatka profilowa. Oczywiście w tego typu pomiarach nie ma informacji o zmianach przewyższenia terenu na liniach profilowych. Tak zrealizowane

pomiary bez odniesienia przestrzennego w układzie współrzędnych geodezyjnych posiadają ograniczoną użyteczność. Brak możliwości przetwarzania danych z zastosowaniem procedur, dla których podstawą jest informacja przestrzenna, powoduje ograniczenia w poprawnej interpretacji danych. Powiązanie pozyskanych danych z dowolnym układem przestrzennym oczywiście można zrealizować poprzez osobne pomiary geodezyjne i odpowiednie transformacje. Wydłuża to jednak proces pozyskania i przetwarzania danych, a im obszar większy i trudniejszy poprzez zagospodarowanie i deniwelację, tym mniejsza zasadność takiego podejścia. Rozwiązaniem jest geopozycjonowanie anteny georadarowej prowadzone w czasie rzeczywistym z zastosowaniem technik pomiarów geodezyjnych umożliwiających wyznaczanie pozycji ruchomego obiektu. Istotne prace w tym obszarze przedstawili Lehmann i Green (1999, 2000) z ETH Zurich. W pierwszej pozycji zaprezentowano półautomatyczny georadarowy system pozyskiwania danych, a w drugiej wykazano zasadność stosowania migracji topograficznej jako jednego z procesów przetwarzania danych georadarowych, który wymaga ich geopozycjonowania. Krajowe ośrodki zajmujące się geofizyką inżynierską nie podejmowały w owym czasie tego tematu. Stało się to na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH, który od 2001 roku posiada własną jednostkę georadarową. W ramach projektu KBN 4 T12 048 27 „Wykorzystanie zintegrowanego systemu GPR-GPS w procesie uzupełniania treści map tematycznych struktur podpowierzchniowych” realizowanego w latach 2004-2007, przygotowano własny system półautomatycznego pozyskania danych georadarowych. Zagadnienie to ujęte jest bardzo szeroko w rozprawie doktorskiej oraz w pracach Lendy (2007a, 2007b), stanowiących efekt kooperacji z habilitantem.

W oparciu o powyższe rozważania autor wkrótce po uzyskaniu stopnia doktora, czyli w roku 2007, przygotował **publikację nr 1** pod tytułem „***Automation of the integration process of georadar and geodetic data acquired with the integrated GPR-GPS system or GPR-TCA type tachymeter***”. W pracy przedstawiono algorytm i efekt weryfikacji autorskiego oprogramowania umożliwiającego automatyzację procesu integracji danych georadarowych i geodezyjnych pozyskiwanych zintegrowanym zestawem GPR-GPS lub GPR-tachymetr typu TCA. Algorytm obejmuje również konwersję wektorowej treści echogramów z uwzględnieniem odpowiednich korekt geometrycznych do środowisk CAD/GIS.

Mimo że przygotowane rozwiązanie podane w publikacji nr 1 ma charakter uniwersalny, to z geodezyjnego punktu widzenia przede wszystkim podnosiło skuteczność stosowania georadaru w zakresie inwentaryzacji sieci uzbrojenia i uzupełniania treści map tematycznych, dziś baz danych GESUT (Gocał i in., 2007; Ortyl i Owerko, 2007).

Rozwój technologii globalnego i mobilnego gromadzenia informacji o otaczającym świecie z zastosowaniem wielu technologii teledetekcyjnych nakierunkowany jest na wzajemną integrację tak zdobytych informacji w przestrzeni 3D dla zasilania graficznej części GIS (Tischler, 2002). Ciągłe rozwijające się rozwiązania GIS, w ostatnim czasie integrowane z BIM, ułatwiają pracę na danych wieloźródłowych i stwarzają możliwości analiz wielopoziomowych. Taki kierunek jest zasadny zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i użytkowego. W obszarze badawczym pozwala uwidocznic i analizować zależności, które kiedyś, jeśli były dostrzegane, wymagały wielu godzin czasochłonnego korelowania. W sferze użytkowej umożliwia precyzyjniejszą ocenę zjawisk mających negatywne i pozytywne skutki oddziaływania w danym obszarze przestrzeni. Przykładem takiego podejścia w nauce jest monografia (Grabiec, 2017), w której korelowanie wyników danych georadarowych pochodzących z dużych powierzchniowo obszarów z innymi danymi pomiarowymi umożliwiły analizy przestrzenne a na ich podstawie oceny stanu i współczesnych zmian systemów

lodowcowych Svalbardu.

W sferze użytkowej dominujący od niedawna kierunek działań to wspomaganie procesów projektowych poprzez integrację GIS-BIM, w tym danych geotechnicznych (Topolnicki, 2016) nakierowanych na automatyzację procesów obliczeniowo-projektowych na bazie coraz lepszych modeli. Istotą wielu działań stała się szczególnie problematyka zdefiniowania relacji wzajemnych elementów obu przestrzeni modelowania danych (Chognard i in., 2018; Zhang i in., 2018). Niemniej ważna pozostaje nadal metodologia pozyskiwania, przetwarzania i dostarczania wiarygodnych danych geofizycznych, które będą półautomatycznie lub automatycznie zasilały systemy informatyczne. Istotny wpływ na takie ukierunkowanie działań mają metody zdalnego pozyskania informacji geometrycznej poprzez zastosowanie technologii pomiarów lidarowych. Ich produkty, jakimi są NMPT lub NMT, stanowią doskonałą bazę integracji dla pozostałych danych teledetekcyjnych. W tym obszarze silnie ujawnia się także znaczenie i możliwość przetwarzania pomiarów georadarowych i operowanie ich treścią w 3D. Zdaniem autora dane georadarowe pozyskiwane z georeferencją bezpośrednią, przez analogię do danych ALS i TLS, można nazwać UgRS (*underground radar scanning* – podpowierzchniowe skanowanie radarowe). Analogicznie jak w przypadku pomiarów ALS/TLS, pomiar UgRS oparty jest na rejestracji emitowanej amplitudy fali elektromagnetycznej, która niesie informację o wartości intensywności sygnału odbitego od struktur ośrodka. Konwersja czasowa w oparciu o model prędkości pozwala na wyznaczenie przestrzennej pozycji punktu odbicia z dokładnością adekwatną dla metody pomiaru i jej geopozycjonowania. Zagadnienie to jest przedmiotem części **publikacji nr 2** pod tytułem **„Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową”**. Zaprezentowano w niej autorski algorytm przetwarzania danych georadarowych do postaci chmury punktów UgRS (podpowierzchniowe skanowanie radarowe). Zagadnienie przetwarzania danych georadarowych do postaci chmury UgRS wynikało z potrzeby rozwiązania szerszego problemu badawczego dotyczącego wiarygodności geometrycznej danych georadarowych. Problem ten związany jest z obszarem badań georadarowych realizowanych na potrzeby budownictwa na etapie projektowym, wykonawczym i eksploatacyjnym.

B. Pomiary georadarowe w rozpoznaniu podłoża gruntowego w budownictwie – przetwarzanie, geometryzacja i modelowanie georadarowego pola falowego.

Etap projektowy związany jest z rozpoznaniem podłoża gruntowego, które jest niezwykle istotne w procesie projektowania wszystkich inwestycji budowlanych. Pozwala ograniczyć dodatkowe koszty w późniejszym etapie realizacji i w czasie eksploatacji obiektów inżynierskich. W myśl przepisów Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2) jednym z narzędzi wspomagających proces rozpoznania podłoża są badania prowadzone metodami geofizycznymi (Dec, 2010; Mościcki i in., 2014; Oryński i in., 2016; Štěpančíková i in., 2011; Tomecka-Suchoń i Marcak, 2015; Bestyński i in., 2017). Rozpoznanie podłoża gruntowego prowadzone z zastosowaniem różnych metod geofizycznych standardowo realizowane jest w celu pozyskania przekroju geofizycznego typu B-skan. Realizacja kilku profili geofizycznych poprzez analizę C-skanów daje możliwości przestrzennego okonturowania zmian ośrodka (Czarniak i in., 2017; Popiołek i Pilecki, 2005; Pilecki i in., 2008). Takie podejście pozwala oszacować zasięg rozpoznanych utworów, co jest szczególnie istotne przy projektowaniu wzmocnienia, ocenie stateczności i wymianie gruntów. Każda z metod geofizycznych ma swoje zalety i ograniczenia. W realiach krajowych istniejąca „Instrukcja badań podłoża gruntowego

budowli drogowych i mostowych”, która powstała na potrzeby Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych w 1998 r., wskazuje na możliwości stosowania metod geofizycznych, ale nie reguluje zasad prowadzenia pomiarów, doboru narzędzi i sprzętu pomiarowego w relacji do problematyki badań. Niewłaściwe podejście metodyczne może prowadzić do nadinterpretacji uzyskanych wyników.

Potrzeba dostosowania przepisów do bieżącego stanu technologicznego spowodowała, iż w 2015 r. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) i Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID) ogłosiły konkurs na realizację projektu *„Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”*. Projekt był realizowany przez konsorcjum naukowe w składzie: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Akademia Górniczo-Hutnicza (trzy jednostki), Politechnika Warszawska. Jako współorganizator konsorcjum oraz kierownik projektu na AGH miałem wpływ na kierunek realizacji prac i efekty projektu. Efektem rzeczowym zakończonego w 2018 roku grantu jest projekt *„Wytycznych badań podłoża budowlanego w drogownictwie”*.

Zakres stosowania metod geofizycznych, w tym metody georadarowej, został ujęty w projekcie *Wytycznych* bardzo szeroko: od problematyki, poprzez dobór metod badań, po ich opracowanie i dokumentowanie. W ramach projektu zrealizowano dużą liczbę terenowych badań weryfikacyjnych. Pomiary geofizyczne konfrontowane z odwiertami realizowano na 9 z 13 poligonach testowych rozmieszczonych w odpowiednio wyselekcjonowanych rejonach kraju. Jako uczestnik projektu kierujący zespołem AGH odpowiedzialnym za obszar badań georadarowych (bezpośrednio) i elektrooporowych (pośrednio), wykonałem i opracowałem łącznie 17 000 m danych georadarowych. Do ważniejszych poligonów badawczych należały dwa odpowiednio dobrane podkrakowskie rejony (Zakrzówek i Mydlniki), gdzie wykonano wiele prac testowych wykraczających poza standard przewidziany na pozostałych polach badawczych. Z badań i ich opracowania powstały niepublikowane raporty. Formę publikacji nadano problematyce związanej z oceną wpływu parametrów pomiarowych metody GPR na jakość rozpoznania struktur podłoża, gdyż na rynku dostępnych jest wiele różnorodnych systemów georadarowych o odmiennych parametrach pomiarowych. Do najbardziej istotnych parametrów należą: liczba próbek sygnału, częstotliwość próbkowania sygnału, typ anteny, składanie (sumowanie) sygnału i odległość pomiędzy trasami. Zagadnienie to prezentują **publikacje nr 3 i 4** zatytułowane: ***„Ocena wpływu wybranych parametrów profilowań georadarowych w badaniach podłoża gruntowego dla potrzeb budownictwa na przykładzie zrębu Zakrzówka”*** oraz ***„Importance of selecting parameters of georadar profiles in karst area”***. W wyniku przeprowadzonych prac sformułowano wnioski opisujące zależności pomiędzy parametrami pomiarowymi a jakością sondowania georadarowego. Niektóre z nowoczesnych systemów georadarowych ze względu na ich zawężone ukierunkowanie w badaniach georadarowych nie umożliwiają swobodnego doboru parametrów pomiarowych w pełnym zakresie. Jest to o tyle problematyczne, że coraz częściej georadar staje się utylitarnym narzędziem w rękach różnych służb i wykonawców, niekoniecznie związanych z geofizyką. Niejednokrotnie operatorzy nie potrafią w pełni wykorzystać potencjału systemów GPR. Nie zdają sobie sprawy z ograniczeń technicznych aparatury niekierunkowanej na konkretny cel detekcji i próbują ją stosować do innych potrzeb. Przedstawione w publikacjach wyniki analizy i postawione wnioski stanowią istotne wskazanie dla wykonawców badań georadarowych, zarówno w celu ich właściwej realizacji, jak i doboru sprzętu pomiarowego. Publikacje mogą również posłużyć zleceniodawcom badań georadarowych w zrozumieniu zależności kształtujących jakość tego typu opracowań eksperckich.

Parametry aparatury badawczej to nie jedyna determinanta pomiarów georadarowych. Szeroka przestrzeń zależności obejmuje sam ośrodek propagacji i przetwarzanie obrazów georadarowych w oparciu o procedury cyfrowego przetwarzania sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Metoda georadarowa wykazuje szczególną skuteczność na granicach materiałów o dużym zróżnicowaniu względnych przenikalności elektrycznych i w materiałach o niskiej przewodności. Takie warunki występują na granicy powietrza i gruntu oraz powietrza i skały (zwłaszcza tej o wysokiej zwężności). W projekcie *Wytycznych* metoda georadarowa jest szczególnie rekomendowana w detekcji płytkich (do kilku metrów p.p.t.) pustek naturalnych i antropogenicznych. Będą to rejony występowania zjawisk krasowych (jaskiń), pustek pogórnich, zwietrzelin oraz granic między materiałami o niskiej przewodności a utworami o wysokiej przewodności.

W tego typu badaniach, z punktu widzenia geofizyki, ale przede wszystkim geodezji jako dziedziny opierającej się na zależnościach geometrycznych, kluczowa do rozstrzygnięcia jest kwestia, czy obraz z badania GPR informuje jedynie o zmienności struktury ośrodka, czy pozwala także na określenie położenia stropu i spągu pustki oraz jaki jest stopień wiarygodności geometrycznej rozpoznania. Analiza tego zjawiska wymaga odwołania się do parametrów fizycznych ośrodka realizacji pomiarów i rozpoznawanych struktur.

Ze względu na uwarunkowania fizyczne skuteczność metody GPR w takich pomiarach jest zdeterminowana wzajemną zależnością względnych przenikalności elektrycznych sąsiadujących ze sobą ośrodków, ich przewodnością i kształtem obiektu. Rozdzielczość pionowa metody zależy od częstotliwości, a pozioma – również od głębokości (Karczewski i in., 2011). W przypadku zjawisk krasowych i pustek pogórnich rozpoznanie prowadzone jest z zastosowaniem anten niskiej częstotliwości (mniejszej lub równej od 250 MHz), tak aby zachowany został kompromis pomiędzy zasięgiem głębokościowym a rozdzielczością pomiaru. W przypadku badań głębszych warstw, znacznie silniej będzie ujawniał się również wpływ związany z istnieniem zjawiska opisywanego jako strefa Fresnela lub ślad pokrycia (Pasternak, 2015). Zjawisko opisane jako strefa Fresnela ma swoje konsekwencje w odzwierciedlaniu obiektów punktowych oraz liniowych. Jego efektem są korzystne interpretacyjnie hiperbole dyfrakcyjne (obiekty punktowe lub liniowe w przybliżeniu prostopadłe do kierunku profilowania, np. sieci przewodów) oraz niekorzystne zniekształcenia geometryczne dla warstw zapadających (Neal, 2004; Grabiec, 2017).

Kolejny czynnik mający wpływ na geometryczną interpretację liniowych struktur lokalizowanych z zastosowaniem georadaru to topografia terenu. W ogólności zmienność topografii ma wpływ na kształt anomalii rejestrowanej na echogramie. Efekt ten nabiera znaczenia już przy pochyleniach terenu rzędu 6% (Lehmann i Green, 2000).

Zaburzenia geometrii rozpoznawanego obiektu będą również wynikały ze zmienności prędkości fali w różnych warstwach albo różnej głębokości zalegania stropu w przypadku pustki, co przekłada się na obraz spągu.

W procesie przetwarzania danych georadarowych możliwe jest wprowadzenie podstawowych i zaawansowanych procedur filtracyjnych, które potencjalnie częściowo eliminują zniekształcenia, których genezę opisano powyżej. Procedura dekonwolucji stosowana jest dla podniesienia rozdzielczości materiału pomiarowego i usunięcia refleksów wielokrotnych. Procedura migracji ma przeciwdziałać skutkom zjawiska strefy Fresnela dla warstw zapadających. Procedura migracji topograficznej przeciwdziała zniekształceniom wywołanym wpływem deniwelacji terenu na zobrazowanie georadarowe. Dla rozpoznania obiektów przestrzennych, jakimi są pustki, interesującym rozwiązaniem jest również filtracja polegająca na analizie amplitudy chwilowej sygnału z zastosowaniem transformacji Hilberta

(Karczewski i in., 2011).

Obszerne studium i dyskusję przywołanych zależności autor zaprezentował w wielołątkowej **publikacji nr 2** pod tytułem: **„Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową”**, obejmującej wiele problemów z zakresu geometrycznych uwarunkowań metody georadarowej. Unikalną częścią pracy jest szeroko udokumentowane zagadnienie doboru procedur filtracyjnych i ich parametrów w optymalnym przetwarzaniu danych georadarowych, wychodzące poza standardowe procedury filtracji, w tym również te, które mają znaczenie dla korekcji geometrycznej zobrażeń georadarowych.

Pozostając w zakresie problematyki rozpoznania podłoża gruntowego, autor zwraca uwagę, iż w wyniku terenowych prac badawczych przywołanego grantu RID zgromadzono szeroki materiał badawczy ujęty w raportach w oparciu o moją koncepcję walidacji jednostek pomiarowych 7 jednostek radarowych 4 różnych producentów. Badania zrealizowano w jednakowych warunkach pomiarowych na tych samych profilach. Jest to wynik bez precedensu nawet w ujęciu literatury światowej. W chwili obecnej trwają dodatkowe analizy danych i przygotowywana jest współautorska publikacja.

C. Pomiary georadarowe w inwentaryzacji drogowych obiektów inżynierskich wraz z modelowaniem georadarowego pola falowego.

Potencjał metody georadarowej, a szczególnie aparatury badawczej doposażonej w anteny ekranowane, ujawnia się w obszarze prac inwentaryzacyjnych na etapie wykonawczym i eksploatacyjnym inwestycji budowlanych w drogownictwie. W celu oceny stanu dróg realizowane są badania diagnostyczne. Ocenie poddawany jest stan nawierzchni drogowej w zakresie zdefiniowanym w wytycznych stosowania „Systemu Oceny Stanu Nawierzchni SOSN” (GDDKiA, 2010). W publikacjach dotyczących diagnostyki nawierzchni poświęca się bardzo dużo uwagi badaniom prowadzonym z zastosowaniem radarów do penetracji gruntu (Sudyka, 2006; Judycki i Jaskuła, 2010). Problematyka ta, podejmowana przez autora znacznie wcześniej, znalazła również swoje odzwierciedlenie w zapisach wytycznych będących efektem projektu RID. Metoda GPR zalecana jest w tych obszarach, gdzie planowane są remonty albo przebudowy i konieczne jest pozyskanie informacji o sieciach uzbrojenia terenu oraz w sytuacjach, gdzie mamy do czynienia z nawierzchniami drogowymi i istotna jest informacja o stanie warstw drogowych albo o podłożu pod nawierzchnią. W takich warunkach inne metody ze względu na uwarunkowania techniczne są nieskuteczne i spośród metod nieinwazyjnych pozostaje metoda GPR.

Prace w obszarze zastosowania metod georadarowych w ocenie stanu nawierzchni drogowych podjąłem na etapie doktoratu w ramach realizacji projektu KBN 4 T12E 003 29 **„Badanie przydatności metody radarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów podpowierzchniowych”**, realizowanego w latach 2005-2006, a ich rezultaty przedstawiłem w dwóch publikacjach (Ortyl, 2007a; Ortyl, 2009). Motywatorem działania były doświadczenia wielu zagranicznych agencji utrzymania infrastruktury drogowych, z których wynika, że metoda GPR powinna być stosowana jako metoda uzupełniająca, a nawet podstawowa, w zakresie badania stanu nawierzchni drogowych (Willett i Rister, 2002; Saarenketo i Scullion, 2000; Morey, 1998). Prace w tym obszarze kontynuowałem po doktoracie a efektem jest **publikacja nr 5** pod tytułem **„Assessing of the effect of selected parameters of GPR surveying in diagnosis of the condition of road pavement structure”**. Jest ona trzecią pozycją dopełniającą moje dociekania w tym temacie. Przedstawiono w niej wyniki prac testowych,

które wykonano georadarem na nowo budowanym odcinku trasy drogowej. Ich celem była jakościowa i ilościowa ocena relacji pomiędzy detekcją a wyznaczaniem grubości warstw konstrukcji nawierzchni drogowych w zależności od wybranych parametrów sondowań georadarowych przy zastosowaniu zestawu georadaru RAMAC/GPR jednostka CU II i ProEx oraz antenach o różnych częstotliwościach. Przedstawione w artykule wyniki stanowią studium przypadków, które mogą mieć miejsce podczas badawczych prac diagnostycznych. Zestawione wyniki badań są istotne dla znalezienia kompromisu pomiędzy właściwym doбором parametrów pomiarowych w aspekcie uzyskania najlepszej jakości danych georadarowych a ekonomicznym wykonaniem zadania pomiarowo-badawczego. Ważnym przyczynkiem badań była również kwestia konfrontacji starszych i nowszych rozwiązań sprzętowych tej samej firmy. Przedstawione wnioski mają charakter uniwersalny w sferze pomiarów georadarowych realizowanych w zakresie nawierzchni drogowych. Temat jest nadal aktualny i bardzo szeroki.

Niezwyczajnie istotnym elementem infrastruktury drogowej są obiekty inżynierskie. Obiektów mostowych w sieci dróg publicznych jest 35 tys. z czego 7 tys. w zarządzie GDDKiA, a około 3,5 tys. w utrzymaniu PKP i stanowią one dominującą liczbę wśród obiektów inżynierskich. Zapisy *Prawa budowlanego* narzucają okresowe prace kontrolne, których zakres jest sprecyzowany przez zarządzenia zarządców obiektów, np. „*Instrukcję przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich*”, czyli załącznik do zarządzenia nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 7 lipca 2005 r. Problematykę budowy i utrzymania mostów oraz identyfikację uszkodzeń i diagnostyki obiektów opisują Bień (2010), Madaj i Wołowicki (2001) oraz Radomski (2016). Przywołane publikacje wskazują w obszarze badań diagnostycznych na szerokie zastosowanie metod bezinwazyjnych, w tym metody georadarowej. W oparciu o doświadczenia wynikające z publikacji zagranicznych (m.in. Hugenschmidt, 2002; Hugenschmidt, 2004) dotyczących inspekcji elementów zbrojenia konstrukcji żelbetowych, w latach 2005 i 2006 prowadziłem prace w tym zakresie, a ich wyniki opisałem w rozprawie doktorskiej. Kontynuowana przeze mnie po uzyskaniu stopnia doktora działalność w tym zakresie zaowocowała współpracą z Politechniką Śląską i pracownikami Katedry Mechaniki Mostów. Szczególnym obiektem dociekań były kwestie identyfikacji przebiegu kabli sprężających i poszukiwań wiarygodnych metod weryfikacji ich mocowania i przebiegu (np. Cruz i in., 2010; Wanecki i Drwięga, 2011). Jest to temat niezwykle istotny, gdyż norma PN-S-10040:1999 i Specyfikacja Techniczna Wykonania i Odbioru Robót (STWiOR) nakładają obowiązek inwentaryzacji przebiegu osłon kabli metodami geodezyjnymi przy szalowaniu, a niejednokrotnie okazywało się, że po betonowaniu dochodziło do ich przesunięć. W tym zakresie powstały w roku 2013 **publikacje nr 5 i 6** zatytułowane: „***GPR identification of prestressing tendons in areas with high density of ordinary reinforcement***” oraz „***Identification of prestressing tendons using ground penetrating radar in particular the anchorage zone***”.

W artykułach zaprezentowano wyniki badań georadarowych i ich analizę w zakresie lokalizacji zbrojenia miękkiego i cięgien sprężających oraz stref zakotwień głowic cięgien na drogowym obiekcie mostowym o ustroju nośnym stanowiącym jednokomorową pięcioprzęślową skrzynkę sprężoną o schemacie statycznym belki ciągłej.

Ważnym aspektem badania konstrukcji obiektów inżynierskich jest detekcja pustek, tzw. raków, powstałych w wyniku złego rozprowadzenia mieszanki betonowej, szczególnie w rejonach silnego skumulowania zbrojenia konstrukcji. Problematyka ta ujawnia się szczególnie w przypadku podpór mostów kolejowych, gdzie projektowana jest większa ilość zbrojenia ze względu na większe i bardziej dynamiczne obciążenia.

Metodykę badań oraz analizę uzyskanych wyników diagnostyki georadarowej podpór mostowych i detekcję pustek przedstawiono w **publikacji nr 8** pod tytułem **„Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar method”**. Publikację oparto o dane pozyskane w wyniku badań zrealizowanych na żelbetowej podporze mostu kolejowego o nietypowym trapezowym kształcie z gęsto rozmieszczonym zbrojeniem. Znamienne w publikacji jest przetwarzanie danych georadarowych pozyskanych na obiekcie rzeczywistym, a nie na modelach laboratoryjnych, co ma wpływ na uwiarygodnienie praktycznych aspektów metody. Oryginalnym podejściem w tej tematyce było włączenie w proces inspekcyjny procedur modelowania pola falowego metodą FDTD (*finite differential time domain*). Jest to metoda numeryczna umożliwiająca rozwiązanie równań Maxwella w domenie czasu, najbardziej rozpowszechniona w modelowaniu rozkładu pola elektromagnetycznego. Jej założeniem jest podział analizowanego obszaru na komórki o niewielkich rozmiarach, tzw. komórki Yee (Yee, 1966), oraz zastąpienie pochodnych cząstkowych w równaniach Maxwella ilorazami różnicowymi. Pozwala to uzyskać sztuczny obraz georadarowy w oparciu o zakładaną (przybliżoną) geometrię rozkładu struktur wewnętrznych ośrodka i ich parametrów fizycznych. W ten sposób powstaje wyjściowy materiał referencyjny dla rzeczywistych wyników terenowych umożliwiający podniesienie pewności interpretacji pozyskanych wyników. Realizując modelowanie, należy mieć na uwadze ograniczenia metody i warunki przygotowania parametrów modelowania (Gołębiowski, 2006; Karczewski i in., 2011; Pasternak, 2015). W przywołanej **publikacji nr 8** pod tytułem **„Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar method”** zastosowanie modelowania uwiarygodniło lokalizację identyfikowanych pustek w podporze i pozwoliło podać właściwą metodykę prowadzenia prac i interpretacji danych georadarowych w inspekcji tego typu zjawisk z zastosowaniem metody GPR. Wskazane strefy anomalne umożliwiły ocenę wpływu zidentyfikowanych pustek na nośność konstrukcji poprzez utworzenie powłokowego modelu MES podpory. Uzyskane wyniki wykorzystano przy sprawdzeniu nośności podpory oraz przy tworzeniu skutecznego programu naprawczego.

Inny obszar wykorzystania procedur modelowania przedstawiono w **publikacji nr 2** pod tytułem: **„Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową”**. W tym przypadku przedmiotem modelowania były zjawiska krasowe jako reprezentacja pustek pochodzenia naturalnego i pogórniczego. Znamiennym wkładem w ocenę możliwości metody georadarowej była analiza, którą przeprowadzono na danych pozyskanych w terenie i na danych modelowych wygenerowanych z zastosowaniem metody różnic skończonych FDTD. Modelowanie przeprowadzono dla dwóch źródeł fali: eksplodująco-odbijającego oraz punktowego. Przedstawiona metodyka i konfrontacja między rzeczywistym kształtem jaskini pozyskanym z inwentaryzacji metodą TLS, georadarowymi danymi terenowymi oraz danymi modelowymi umożliwiły zestawienie wielu wniosków związanych z oceną możliwości geometryzacji kształtu pustek podpowierzchniowych lokalizowanych georadarem.

D. Zasady i dokładnościowe aspekty prowadzenia pomiarów metodą naziemnej interferometrii radarowej.

Okres 2008-2016 to także czas moich intensywnych działań badawczych w zakresie techniki naziemnej interferometrii radarowej. Umożliwia ona prowadzenie monitoringu przemieszczeń i odkształceń różnych obiektów inżynierskich oraz form naturalnych.

Technologia GB-SAR (*Ground-based synthetic aperture radar*) rozwijana od początku 2000 roku uzyskała swoją komercyjną formę w 2007 jako system IBIS opracowany przez włoską firmę IDS. Nazwa systemu pochodzi od akronimu angielskiej nazwy *Image by Interferometric Survey*. W ramach przygotowanego przez autora wniosku o przyznanie dotacji na inwestycję aparaturową w roku 2008 zakupiono w Katedrze Geodezji inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska jednostkę pomiarową naziemnego radaru interferometrycznego. Był to 16 egzemplarz działający komercyjnie na świecie.

System przygotowany był w dwóch konfiguracjach. Pierwszą jest IBIS-S, o zasięgu pomiaru do 1 km, dokładności pomiaru przemieszczeń wynoszącej 0,1 mm w trybie dynamicznym i 0,01 mm w trybie statycznym. Istotny parametr to tzw. rozdzielczość odległościowa, czyli odległość (zakres) pomiędzy miejscami obserwowanymi, która wynosi minimalnie 0,5 m. Podczas pracy radar oświetla obiekt wiązką fal, które zostają rozproszone w miejscach, gdzie struktura obiektu jest niejednorodna. Zmienność wyników obserwacji fazy sygnału w czasie jest podstawą do wyznaczenia przemieszczeń punktów reprezentujących obiekt i wchodzących w zakres obserwacji. Jednostka radaru IBIS-S służy do jednowymiarowych obserwacji przemieszczeń i deformacji obiektów inżynierskich wywołanych obciążeniem stałym bądź dynamicznym.

Druga konfiguracja systemu to IBIS-L, zaprojektowany z myślą o monitoringu powierzchniowym (osuwiska, zbocza, lodowce, lawiniska, tereny wulkaniczne, zapory). Zasięg pracy wynosi 4 km przy deklarowanym błędzie pomiaru przemieszczenia 0,1 mm i rozdzielczości azymutalnej min. 0,25°. Pomiar jest realizowany analogicznie jak w IBIS-S z tym, że jednostka wykonuje dodatkowo ruch liniowy w kierunku prostopadłym do nadawanego sygnału zgodnie z ideą pomiarów SAR. Pomiar realizowany w interwałach kilkuminutowych dostarcza kolejnych zobrazowań, które umożliwiają wyznaczenie przemieszczeń powstających w obserwowanej scenie.

Deklarowany zasięg, rozdzielczość i potencjał dokładnościowy prezentują imponujące wartości i wykraczają poza dotychczas stosowane klasyczne instrumenty geodezyjne. Biorąc pod uwagę, iż wyniki pozyskuje się zdalnie i bezkontaktowo, jest to bardzo obiecująca technologia. Deklarowane możliwości technologii wymagały realizacji wielu pomiarów terenowych ukierunkowanych na weryfikację tych wartości, przedstawienia metodologii realizacji pomiarów dla wybranych grup obiektów oraz przetwarzania wyników w oparciu o zasady cyfrowego przetwarzania sygnału. W roku 2010 finansowanie MNiSW uzyskał projekt badawczy „*Opracowanie zasad wyznaczania drgań i przemieszczeń budowli inżynierskich z wykorzystaniem interferometrii radarowej*”. Ze względu na pełnione przez kierownika projektu funkcje dziekańskie zostałem poproszony nieformalnie o całościowe zarządzanie finansowe i merytoryczne wspomnianym projektem.

Pierwszy zakres badań testowych obejmował prace weryfikujące dokładność metody w warunkach terenowych, gdzie silnie ujawniają się problemy wpływu zmienności warunków atmosferycznych i efekt dryfu. Aby dokonać rzetelnej weryfikacji wpływu czynników sprzętowych i geometrycznych na wyniki uzyskiwanych przemieszczeń, konieczne było opracowanie nie tylko idei poszczególnych doświadczeń, ale również wielu rozwiązań konstrukcyjnych baz testowych, które umożliwiały realizację kontrolowanych wartości przemieszczeń i ich czasową (automatyczną lub półautomatyczną) rejestrację. Wymagało to poszerzenia wiedzy z zakresu urządzeń umożliwiających realizację, kontrolę i wyznaczenie przemieszczeń względnych z dokładnością na poziomie oferowanym przez jednostkę IBIS i lepszą (czujniki zegarowe mechaniczne, indukcyjne, pojemnościowe, tensometry, enkodery, urządzenia laserowe: interferometr i wibrometr). Zarządzany przeze mnie zespół uzyskał

wyniki, które po wnikliwej analizie wskazały na istnienie błędu systematycznego. O tym fakcie został poinformowany włoski producent, który po własnych testach dokonał korekt, eliminując ten problem. W innych testach zweryfikowano kwestię stabilności sygnału oraz problem związany z rozdzielczością pomiaru i wspomnianym już zjawiskiem „clutter”, które jeszcze bardziej niż w metodzie georadarowej ujawnia się w danych pochodzących z interferometrii radarowej. W literaturze przedmiotu na czas projektu pojawiały się publikacje, które wskazywały obszary stosowania metody, a mniej było opracowań ściśle weryfikujących dokładność uzyskiwaną w warunkach terenowych. Dlatego przedstawiane wyniki prac testowych bez wątpienia miały charakter pionierski w skali kraju i co najmniej środkowej części Europy.

Wyniki tych prac przedstawiono w publikacjach cyklu o numerach od 9 do 12. **Publikacja nr 12** to monografia anglojęzyczna pod tytułem *„Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry”*, w której dwa obszerne rozdziały poświęcono problematyce dokładnościowej. W rozdziałach tych przedstawiono również rozważania na temat wpływu warunków atmosferycznych oraz fizycznych cech obiektów na wynik pomiaru. **Publikacja nr 9** pod tytułem *„Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements”* jest szerokim studium w zakresie wiarygodności otrzymywanych przemieszczeń ze wskazaniem na konieczność pozyskiwania odpowiednich korekt geometrycznych. Oryginalnym aspektem publikacji jest walidacja pomiarów radarowych dla potrzeb weryfikacji wskazań systemów wizyjnych rozwijanych przez zespół naukowy Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w celu wyznaczania ugięć przęseł mostowych. **Publikacja nr 10** pod tytułem *„Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry – case study”* jest znamieną publikacją weryfikującą wyniki badań radarowych przeprowadzanych podczas obciążeń próbnych prowadzonych zgodnie z zaleceniami zarządców dróg (GDDKiA, 2008) oraz normami PN-S-10050:1989, PN-S-10040:1999. Otworzyło to drogę współpracy z Politechniką Śląską i pracownikami Katedry Mechaniki Mostów czy akredytowanymi laboratoriami badawczymi realizującymi próbną obciążenia mostowe.

Przywołane korekty geometryczne są istotne ze względu na fakt, iż radar wyznacza przemieszczenie w kierunku propagacji fali. W przypadku ugięć przęseł mostowych albo obserwacji budowli wysmukłych konieczne jest przeliczenie tych wartości na składowe pionowe lub poziome. Prawidłowe wyznaczenie wymaga ustalenia relacji odległości poziomych i pionowych pomiędzy jednostką radarową a wchodzącym w zakres obserwacji punktem na obiekcie. Metodologię takiego podejścia przedstawiono w **publikacji nr 11**, którą jest rozdział 4 monografii *„Wybrane problemy geodezji inżynierskiej”*, zatytułowany *„Identyfikacja elementów sceny radarowej na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego”*. W pomiarach wykorzystano obserwacje pozyskane z zastosowaniem urządzeń TLS i segmentację chmur punktów na strefy adekwatne do zakładanej rozdzielczości pomiarów radarowych oraz zalecono realizację monitoringu zmienności warunków atmosferycznych mimo stosowania tzw. reflektorów referencyjnych. Zaproponowana metodologia okazała się wizjonerska, gdyż współczesne jednostki radarowe wyposażone zostały w jednostki skanujące i pogodowe.

E. Naziemna interferometria radarowa w pomiarach odpowiedzi konstrukcji wysmukłych na obciążenia statyczne i dynamiczne.

Trzy ostatnie publikacje (nr 12-14) korespondują z kolejnym zagadnieniem badawczo-

wdrożeniowym, ukierunkowanym na wprowadzenie technologii naziemnej interferometrii radarowej do przestrzeni eksperckiego monitoringu zachowań konstrukcji. W obszarze mojego zainteresowania znalazła się ocena odpowiedzi konstrukcji wysmukłych (kominy, maszty, wieże) na obciążenia. W specjalistycznej literaturze można znaleźć szczegółowe wymagania i zalecenia, określające dopuszczalne wartości przemieszczeń i odkształceń (Rykaluk, 2007; PN-EN 1993-3-1:2008; Telekomunikacja Polska, 1994; CICIND, 2001), a także wyniki obserwacji, prowadzonych przy użyciu różnych metod pomiarowych (Ni i in., 2011; Brownjohn, 2007; Cazzaniga i in., 2006).

W przypadku kominów przemysłowych badania dynamiczne często są prowadzone w związku z koniecznością stosowania rozwiązań prowadzących do tłumienia drgań tych budowli. Dotyczy to zarówno kominów żelbetowych (Brownjohn i in., 2010), jak i stalowych (Tranvik i Alpsten, 2002). Analogiczne testy prowadzone są dla wież i masztów (Ghorbani-Tanha i in., 2009).

Wśród wysokich obiektów budowlanych, dla których również są prowadzone badania dynamiczne, znajdują się wieże szybowe oraz turbiny wiatrowe. Na konieczność pomiaru i oceny drgań wież szybowych wskazują przepisy budowlane PN-G-05500:1989. Deformacje dynamiczne są wywołane głównie pracą układów napędowych maszyn wyciągowych, jak również maszyn elektrycznych i wentylatorowych, które mogą powodować uszkodzenia ustroju nośnego. Przykładowe wyniki pomiaru drgań tych obiektów podają Ronghua i in. (2010) oraz Kaliński i in. (2000).

W tym obszarze wykonałem wiele obserwacji terenowych zmierzających do ugruntowania wiedzy i metodyki stosowania naziemnej interferometrii radarowej jako geodezyjnego narzędzia pomiarowego. Przedstawione wyniki obejmują konfrontację techniki GB-SAR z typowymi i alternatywnymi technologiami realizacji testów próbnych w zakresie wykonywania obciążeń statycznych i dynamicznych. Przeprowadzone prace wskazały na zalety i ograniczenia metody, a walidacyjnie potwierdziły ich skuteczność względem innych technik pomiarowych. Omówienie eksperymentów i wyników ujęto kompleksowo w **publikacji nr 12**, którą jest monografia anglojęzyczna ***„Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry”***, w autorskim rozdziale 8 pt. ***„Surveying of static displacement and vibration of high structures”***.

F. Ocena skuteczności pracy masowych tłumików drgań (przeciwdziałanie wpływowi zjawiska wirów Karmana) oraz sposoby wyznaczania logarytmicznego dekrementu tłumienia na bazie klasycznych i radarowych pomiarów geodezyjnych.

Zagadnienie to przedstawiono w **publikacjach nr 13 i 14** pod tytułem ***„Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer”*** i ***„Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods”***.

Potwierdzona wysoka skuteczność pracy naziemnego radaru interferometrycznego, zwłaszcza w obserwacji zachowań dynamicznych, spowodowała, iż uwagę przekierowałem na obserwacje kominów, szczególnie stalowych, wyposażonych w tłumiki drgań. Problematyka ta związana jest z projektowaniem, wykonaniem, montażem i strojeniem tłumików drgań mających przeciwdziałać niekorzystnemu dla stateczności konstrukcji zjawisku wzbudzenia aerodynamicznego. Pomiary nie dotyczą jedynie kominów, ale również skuteczności działania samych tłumików. Na etapie projektowania tłumika konieczna jest znajomość rzeczywistej częstotliwości drgań własnych obiektu. Badania empiryczne pozwalają zweryfikować jej

wartość i wyznaczyć odstępstwo od wartości projektowej. Ponadto dostarczają danych niezbędnych do ewentualnej regulacji poprawności działania tłumika wynikającej np. ze zmienności charakterystyki materiałów na skutek eksploatacji. W wymienionych powyżej pracach przedstawiono zarówno metodykę pomiarów badawczych, jak i analizę wyników w zakresie wyznaczania podstawowych charakterystyk dynamicznych kominów, podczas procesu strojenia masowych tłumików drgań.

Traktując pomiar naziemnym radarem interferometrycznym jako referencyjny, wykazano możliwość stosowania w tym obszarze współczesnych tachymetrów zrobotyzowanych. Prędkość prowadzenia przez nie obserwacji zjawisk o charakterze dynamicznym jest aktualnie rzędu 10 Hz. Przedstawiono również ich ograniczenia w relacji do zapisów normowych oraz rzeczywiste prędkości pomiarowe.

Wyniki prac związanych z przedstawioną tematyką GPR i GB-SAR prezentowano na konferencjach i sympozjach międzynarodowych zarówno geodezyjnych, jak i branżowych, dotyczących geologii i geotechniki, obiektów mostowych i budowli przemysłowych:

- Konferencja Naukowo-Techniczna "Współczesne technologie geoinformacyjne" Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH 28 - 29.05.2009, Kraków,
- X konferencja Naukowo-Techniczna "Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej", 24 - 25.03.2011 Warszawa, Białobrzegi,
- Joint International Symposium on Deformation Monitoring 2–4 November 2011, Hong Kong, China (organizowanych przy współudziale FIG, IAG),
- 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012) 8 - 12.07.2012 Stresa, Italy,
- 13th International multidisciplinary scientific geoconference, 16 - 22.06.2013, Albena, Bulgaria,
- 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 9th – 11th September 2013, Nottingham, UK (organizowanych przy współudziale FIG, IAG),
- 9th Central European Congress on Concrete Engineering: CCC 2013 Concrete structures in urban areas, 4 - 6.09.2013, Wrocław, Poland,
- Konferencja Naukowo-Techniczna „Geodezyjne systemy pomiarowe dla budownictwa” 26-28 czerwca 2014, Warszawa-Serock,
- VI Międzynarodowa konferencja naukowa z cyklu "Innowacyjne technologie geodezyjne - zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki, 10-12 czerwca 2015 r, Kamionka,
- XV Konferencja Zbiorniki 2015: Zbiorniki na materiały sypkie i ciecze, obiekty przemysłowe oraz hydrotechniczne: 19 - 21 październik 2015, Karpacz,
- 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring: 30th March–1st April 2016, TU Wien (organizowanych przy współudziale FIG, IAG),
- X Konferencja Naukowo -Techniczna „Budownictwo w energetyce”: 17-20 maja 2016, Szklarska Poręba,
- Ogólnopolskie sympozjum Współczesne Problemy Geologii Inżynierskiej w Polsce: 17–20.10.2017, Rzeszów.

7. Omówienie wyników badań własnych

A. Przetwarzanie wyników pomiarów georadarowych pozycjonowanych geodezyjnie w aspekcie ich poprawnej geometryzacji, w tym konwersja niemetrycznych echogramów do postaci wektorowej albo geometrycznej chmury punktów – podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UgRS)

Wykonywanie pomiarów georadarowych szczególnie na obszarach rozległych powierzchniowo lub długich ciągach profilowych wymaga zastosowania geodezyjnych systemów pozycjonowania. Takie systemy w połączeniu z georadarem umożliwiają przestrzenną lokalizację miejsc realizacji profili georadarowych w wymaganym układzie współrzędnych, a to podnosi szanse właściwej interpretacji ich treści. Dostarcza również możliwości efektywnego połączenia wyników georadarowych z dowolnym cyfrowym opracowaniem kartograficznym. Pierwsza podana w cyklu habilitacyjnym **publikacja nr 1** pod tytułem „*Automation of the integration process of georadar and geodetic data acquired with the integrated GPR-GPS system or GPR-TCA type tachymeter*” przedstawia zasadę i etapy funkcjonowania autorskiego algorytmu umożliwiającego automatyzację procesu integracji danych georadarowych i geodezyjnych pozyskiwanych zintegrowanym zestawem GPR-GPS lub GPR-tachymetr z funkcją automatycznego śledzenia ruchomego celu. Przedstawione rozwiązanie dedykowane jest jednostce georadarowej firmy Mala Geoscience i rozwiązaniom integracyjnym przedstawionym przez Gocała i in. (2006), ale podane zależności geometryczne mają charakter ogólny dla wszystkich jednostek, w których pozycjonowanie będzie odbywało się poprzez doposażanie anten GPR w antenę GNSS lub pryzmat dalmierczy. W artykule przedstawiono również wyniki testu weryfikującego skuteczność i poprawność pracy oprogramowania, prezentując równocześnie metodykę przetwarzania danych georadarowych doposażonych w georeferencję. Konieczność prowadzenia automatyzacji wynika z faktu, że samo rozwiązanie technicznej integracji systemu GPR i dowolnego geodezyjnego systemu pozycjonowania, takiego jak GNSS czy tachymetr typu TCA, nie zapewnia pozyskania współrzędnych przestrzennych o wysokiej dokładności. Aby podnieść wiarygodność pozycyjną tak pozyskiwanych danych GPR potrzebne jest uwzględnienie koniecznych korekt związanych z ograniczeniami sprzętowymi i warunkami terenowymi. Ograniczenia sprzętowe to brak pełnej synchronizacji czasowej obu systemów, co skutkuje przesunięciem miejsca poboru współrzędnych geodezyjnych jednostki GPS bądź pryzmatu względem punktu rejestracji danych georadarowych. Warunki terenowe to zmienna niwelety linii profilowych, co skutkuje przesunięciem współrzędnych geodezyjnych jednostki GPS bądź pryzmatu względem punktu reprezentującego obiekt podpowierzchniowy. Pełny opis i zależności geometryczne autor podaje w doktoracie i publikacji (Ortyl i Owerko, 2007).

Konieczność uwzględniania wskazanych przez autora korekt wymaga reżimu pozyskiwania i przetwarzania danych georadarowo-geodezyjnych i obejmuje:

- nawiązanie pomiarów geodezyjnych do wymaganego układu współrzędnych,
- wykonanie pomiarów georadarowych i geodezyjnych zintegrowanym zestawem,
- interpolacja współrzędnych,
- korekta wyinterpolowanych współrzędnych śladów georadarowych ze względu na wpływ częstotliwości pracy instrumentów geodezyjnych i pochylenie terenu,
- import współrzędnych skorygowanych w programie do post-processingu danych georadarowych,

- filtracja i interpretacja wyników pomiarów georadarowych,
- wektoryzacja warstw i obiektów zidentyfikowanych na radargramie w układzie współrzędnych geodezyjnych,
- eksport uzyskanych wyników wektoryzacji,
- wyznaczenie ostatecznych współrzędnych wykrytego obiektu z uwzględnieniem korekcji ze względu na pochylenie terenu i głębokość zalegania obiektu.

Przy opracowywaniu wyników pomiarów uzyskanych aparaturą georadarową pozycjonowaną metodami geodezyjnymi wykorzystywane są dane zarówno w procesie:

- filtracji i analizy danych (post-processing),
- wektoryzacji warstw i obiektów podpowierzchniowych,
- wizualizacji wyników opracowania w zakresie programów środowiska CAD lub GIS.

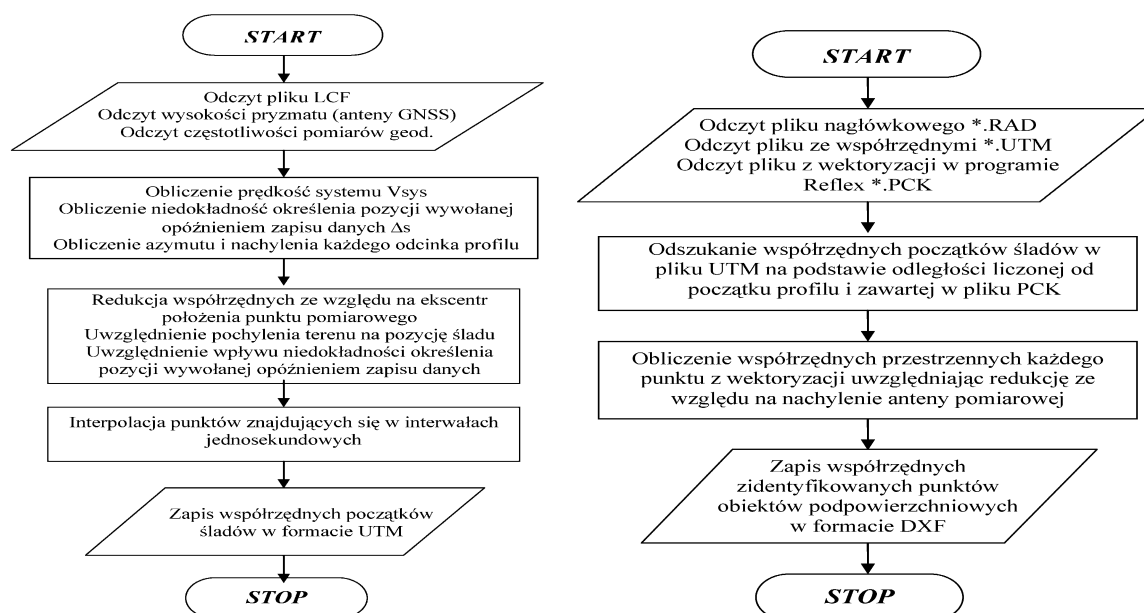
Dane te posiadają różne formaty, które nie są ze sobą zgodne, dlatego przygotowałem schematy blokowe algorytmów, a na ich bazie opracowano oprogramowanie, które zapewnia płynność przetwarzania danych w wyżej wymienionym procesie.

Przygotowany algorytm składa się z dwóch modułów, które mają realizować w podanej kolejności następujące cele:

- przygotować dane terenowe, uzyskane wspomnianym zestawem pomiarowym GPR-GPS lub GPR-TCA (zapisane w plikach natywnych systemu Mała Geoscience), do postaci umożliwiającej pracę w programie do post-processingu danych radarowych,
- przygotować wyniki interpretacji i wektoryzacji treści radargramów dokonane w post-processingu danych georadarowych do postaci umożliwiającej ich wykorzystanie w aplikacjach CAD lub GIS.

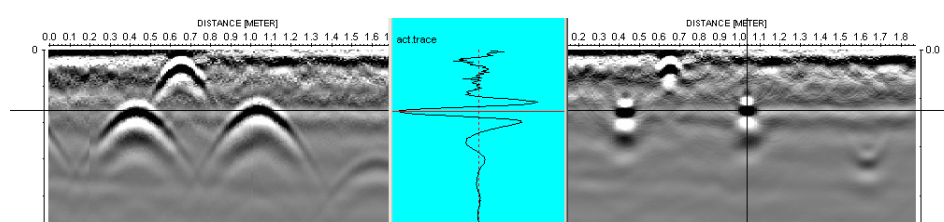
W pierwszym module procedury redukcyjne realizowane są według zależności podanych w publikacji (Ortyl i Owerko, 2007). W algorytmie dodano możliwość translacji współrzędnych pozyskanych systemem pozycjonowania o dowolny wektor przestrzenny tak, aby ewentualnie skorygować błędy nawiązania lub uwzględnić ekscentr montażowy pomiędzy mocowaniami systemu geodezyjnego a punktem odniesienia wyników georadarowych. Program do akwizycji danych pobiera informację o położeniu w interwałach jednosekundowych, przy znacznie większej częstotliwości rejestracji śladów, dlatego omawiana aplikacja wykonuje również interpolację pozycji każdego ze śladów na podstawie współrzędnych zarejestrowanych przez system oraz przy założeniu, iż kolejne ślady mierzone są w stałych interwałach czasowych. Schemat blokowy działania pierwszego algorytmu przedstawiono na rys.1a.

W wyniku post-processingu i wektoryzacji danych georadarowych z nadaną georeferencją, realizowanych w programie do przetwarzania danych georadarowych, otrzymuje się plik tekstowy będący zapisem położenia obiektów i warstw podpowierzchniowych. Jednymi z wielu informacji są współrzędne płaskie punktu oraz zapis próbki związanej z punktem i głębokość względna punktu. Dla potrzeb wizualizacji wyników pomiarów georadarowych w programach typu CAD lub GIS wymagane są dodatkowe redukcje oraz ich zapis w formacie odczytywanym przez te aplikacje. Zagadnienie to rozwiązuje drugi moduł algorytmu, gdzie obliczane są ostateczne wartości współrzędnych przestrzennych wszystkich zwektoryzowanych punktów. Schemat blokowy działania drugiego algorytmu przedstawiono na rys. 1b.



Rys. 1. Schemat blokowy działania algorytmu korygującego pozycję obiektów podpowierzchniowych lokalizowanych zestawem GPR-GPS lub GPR-TCA: a) pierwszy moduł, b) drugi moduł (źródło: publikacja nr 1)

W omawianej publikacji przedstawiłem również eksperyment pomiarowy weryfikujący dokładność pozycyjną lokalizacji elementów podpowierzchniowych z zastosowaniem zestawu GPR-TCA. W pomiarach wykorzystałem antenę o częstotliwości 1000 MHz, która cechuje się najwyższą, w posiadanym zestawie rozdzielczością pionową i poziomą. W pomiarach geodezyjnych wykorzystywano tachymetr wyposażony w oryginalną aplikację o nazwie „GPR tracker”, która wyznacza współrzędne pryzmatu umieszczonego na antenie georadaru z częstotliwością 0,66 Hz (Ortyl i Owerko, 2007). W procesie doświadczalnym wykorzystano detekcję prętów zbrojeniowych, ponieważ w zapisie radarowym odwzorowują się one jednoznacznie (rys. 2), a dokładność ich lokalizacji sytuacyjnej kształtuje się na poziomie 1 cm (Ortyl, 2007b).



Rys. 2. Jednoznaczność odwzorowania prętów zbrojeniowych w zapisie georadarowym przed i po procedurze migracji (źródło: publikacja nr 1)

Na odpowiednim polu testowym wykonałem pomiary testowe i przetworzyłem dane georadarowe zgodnie z wypracowaną metodyką i wykorzystaniem oprogramowanych algorytmów korekcyjnych. Układ osnowy i przebiegu profili przyjęto tak, aby możliwe było dokonanie oceny dokładności optymalnie poprzez analizę współrzędnych tylko jednej osi.

Zrealizowane w tej konfiguracji pomiary pozwalają na ocenę wpływu ruchu instrumentu na dokładność wyznaczenia pozycji obiektów podpowierzchniowych. W doświadczeniu pomiary zrealizowano przy różnych interwałach zapisu śladów georadarowych tj. 0,01 m, 0,03 m, aby ocenić jak parametr ten wpływa na dokładność pozycjonowania

elementów podpowierzchniowych. W odniesieniu do danych referencyjnych opisujących pozycję prętów na kierunku Y wyznaczoną w układzie osnowy niezależnym pomiarem obliczono różnicę współrzędnej Y uzyskanej tachymetrem i poddanej korektom.

Wykazałem, iż błędy średnie wyznaczenia pozycji elementów podpowierzchniowych, wykrywanych zestawem GPR-TCA i przetwarzanych przygotowanym algorytmem, mieszczą się w zakresie $0,04 \div 0,08$ m dla interwału zapisu śladów georadarowych 0,01 m, zaś dla interwału 0,03 m wzrastają do zakresu $0,08 \div 0,12$ m. Przy odległości między stanowiskiem tachymetru a obszarem badań równej 30 m nie odnotowano spadku dokładności pomiaru związanego z ruchem instrumentu w jednej lub dwóch płaszczyznach.

Wyniki poprawności pracy potwierdziłem również w warunkach terenowych podczas lokalizacji podpowierzchniowych elementów sieci uzbrojenia, gdzie przy nachyleniu terenu 5% błąd sytuacyjny położenia punktu reprezentującego odpowiedź od przewodów lokalizowanych zestawem GPR-TCA kształtował się w granicach ± 15 cm (± 10 cm dla GPR-GNSS), natomiast wysokościowo wyniosła ± 3 cm przy kalibracyjnym wyznaczeniu prędkości fali w ośrodku (Ortyl i Owerko, 2007).

Dalsze kierunki działań celem stosowania danych georadarowych i ich przetwarzania w kontekście geometrycznym przedstawiłem w **publikacji nr 2** pod tytułem „**Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową**”. Zgodnie z tytułem, jej istotą jest ocena wiarygodności geometrycznej i interpretacyjnej danych georadarowych w identyfikacji form zjawisk krasowych, przez analogię dla pustek pogórnich czy innych form tunelowych. Z tego powodu na obszar pozyskania danych wybrałem formacje wapienne z licznymi formami krasowymi. Obiekt badań to sala główna jaskini krasowej o wysokości do 3 metrów, zlokalizowana na głębokości od 3 do 7 metrów pod powierzchnią terenu. Takie usytuowanie i kształt struktury podpowierzchniowej umożliwiły mi wykonanie szerokiego zakresu badań będących głównych celem publikacji, które będą przedstawione w kolejnym aspekcie badawczym. W tym miejscu odwołuję się do autorskiego algorytmu przetwarzania wyników pomiarów georadarowych pozycjonowanych geodezyjnie do postaci geometrycznej chmury punktów jako podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UgRS).

Taki kierunek wynikał z celu publikacji, dla realizacji którego potrzebowałem wiarygodnego materiału referencyjnego dla badań georadarowych, procesu przetwarzania, doboru procedur filtracji sygnału GPR oraz interpretacji treści echogramów obrazujących pustkę podpowierzchniową. Z tego powodu w procesie pozyskania danych badawczych do prac włączyłem naziemne skanowanie laserowe (TLS – *terrestrial laser scanning*). Z zastosowaniem technologii TLS pozyskałem geometrię sali głównej jaskini i jej otoczenia. Nad nią wykonano profilowania georadarowe z zastosowaniem zestawu GPR-TCA przywołanego w poprzednio opisanej publikacji. Ze względu na rozwój sprzętu zastosowałem nowsze niż w publikacji nr 1 rozwiązania pomiarowe zarówno dla sprzętu GPR jak i TCA. W tym wypadku tachymetr posiadał już możliwość wyznaczania pozycji na poziomie 5 Hz, co ma korzystne znaczenie dla dokładności pozycjonowania anten georadarowych. Stosując taką metodologię badań, dane georadarowe i geodezyjne pozyskano w jednolitym układzie współrzędnych. Przefiltrowane dane georadarowe, nawet posiadające georeferencję, nie umożliwiają łatwego zestawienia przebiegu geometrycznego echogramu z modelem sali jaskini. Bezpośrednia konfrontacja wyników pomiarów georadarowych i geodezyjnych (chmura punktów) wymaga wzajemnej wizualizacji danych. W tym celu przetworzyłem echogramy poprzez autorski algorytm zamiany danych GPR do postaci chmury punktów jako podpowierzchniowego skanowania radarowego UgRS. Takie podejście narzuca analogia pomiarów GPR do pomiarów

ALS/TLS. Wynik pomiaru GPR oparty jest na rejestracji emitowanej amplitudy fali elektromagnetycznej, która niesie informację o wartości intensywności odbitego od struktur ośrodka sygnału. Konwersja czasowa w oparciu o model prędkości pozwala na wyznaczenie przestrzennej pozycji punktu odbicia z dokładnością adekwatną dla metody pomiaru i jej geopozycjonowania. Jeśli wziąć pod uwagę kierunek rozwoju aparatury georadarowej do konstrukcji wielokanałowych, która w jednym przejeździe rejestruje wiele profili, to zaproponowana przez autora koncepcja podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* - UgRS) jest w pełni uzasadniona.

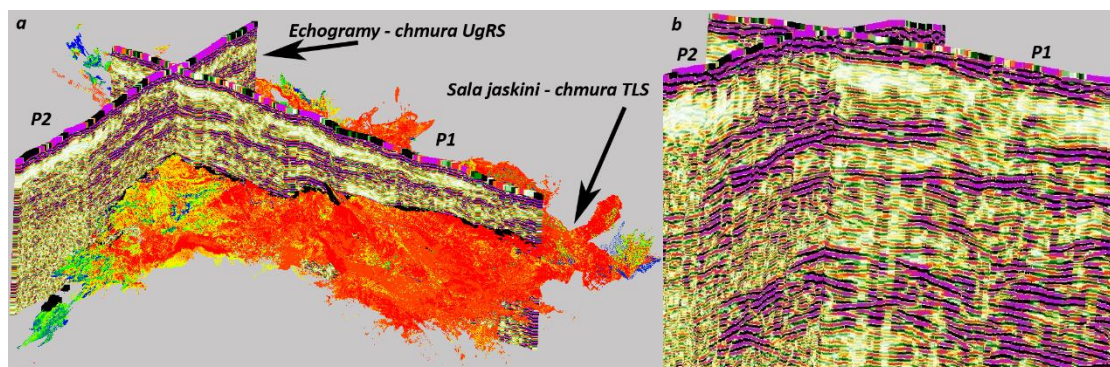
To właśnie zaprezentowana koncepcja przekształceń danych GPR do postaci chmury UgRS dokonana w oparciu o autorski algorytm przygotowany w środowisku MATLAB jest oryginalną częścią publikacji. Przygotowane oprogramowanie składa się z dwóch modułów, które mają realizować w podanej kolejności następujące cele:

- konwersję danych terenowych, uzyskanych wspomnianym zestawem pomiarowym GPR-tachimetr zrobotyzowany, do postaci umożliwiającej post-processing danych radarowych w wybranym programie, po dodaniu korekt związanych z ograniczeniami systemu do akwizycji danych,
- przetworzenie danych georadarowych poddanych filtracji w programie realizującym post-processing do postaci chmury punktów.

Pierwsza procedura jest konieczna i realizowana analogicznie jak we wcześniejszej publikacji z dodatkowymi rozwinieniami. Aplikacja umożliwia zastosowanie procedury wygładzania danych wysokościowych z myślą szczególnie o danych georadarowych pozyskanych z pozycjonowaniem GNSS. Stosowana jest średnia ruchoma z możliwością doboru okna uśredniania.

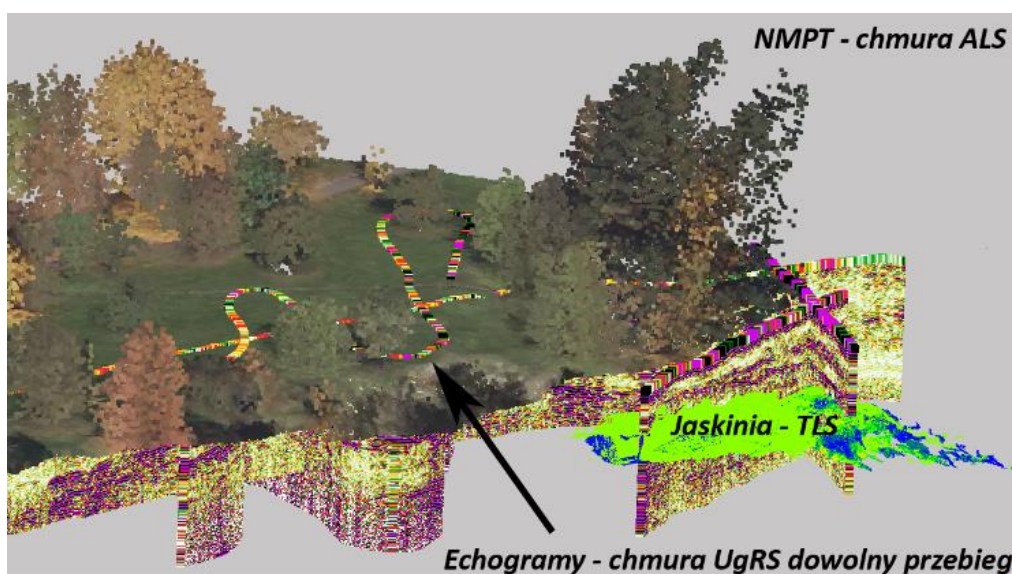
Druga procedura, korzystając z pliku wygenerowanego w programie do przetwarzania danych georadarowych, umożliwia zapis przefiltrowanego echogramu z przypisaną georeferencją do pliku ASCII. Plik zawiera w pierwszym wierszu całkowitą liczbę punktów w chmurze, po której następuje strumień współrzędnych XYZ, wartości intensywności (intensywności odbicia wiązki laserowej) i kolorów w skali RGB dla kolejnych punktów. W oparciu o taki wzór przygotowywany jest plik ASCII na podstawie echogramu, który będzie tożsamy chmurze punktów. Ważną funkcją jest możliwość wyboru, czy A-skany prezentowane są pionowo czy jako pochylone, zgodnie z normalną do powierzchni. Wartość pochyleń obliczana jest na podstawie wartości wysokości z danych geodezyjnych.

Efektem finalnym opisanych przetworzeń jest możliwość pracy na danych georadarowych i na chmurach punktów, co umożliwia ich łączną prezentację wraz z danymi innego typu: TLS (rys. 3a), ALS (rys. 4), wektorowymi i rastrowymi w dowolnym oprogramowaniu obsługującym dane skanowania laserowego. Na uwagę zasługuje fakt zgodności treści echogramów pozyskanych na profilach poprzecznym i podłużnym, mimo pozyskania ich na terenie leśnym i o zmiennej niwelecie (rys. 3b). Gwarantem takiego wyniku są obserwacje pozyskane zestawem GPR-tachimetr zrobotyzowany.



Rys. 3. Prezentacja: a) echogramów P1 i P2 jako chmur punktów UgRS w relacji chmury punktów TLS sali głównej Jaskini Twardowskiego, b) zgodności wyników georadarowych na przecięciu profili P1 i P2 (źródło: publikacja nr 2)

Zaprezentowane przeze mnie rozwiązanie przekształcania danych georadarowych jest niezbędne i stwarza możliwości szerszych analiz danych w aspekcie geometrycznym wykraczającym znacznie poza standardowe rozwiązania producentów. Pozwala również na weryfikację ich interpretacji i daje możliwość integracji z dowolnymi danymi przestrzennymi (rys. 4).



Rys. 4. Prezentacja możliwości integracji danych ALS, TLS i echogramów (UgRS) o „dowolnym przebiegu” przestrzennym (źródło: publikacja nr 2)

Przygotowane rozwiązanie na przestrzeni lat wielokrotnie było stosowane w pracach o charakterze badawczym lub zleconych z przemysłu np. „Wykonanie pomiarów georadarowych systemem GPR – TCR na obszarze przewidywanym pod budowę drogi DK-79 w Jaworznie”, 2010, „Badania podłoża gruntowego metodą georadarową, Zakłady Mesko Skarżysko – Kamienna” (2015), „Badanie georadarowe ociosu solnego w kaplicy Św. Kingi kopalni Soli w Wieliczce” (2017) oraz w ramach projektu badawczego MNiSW N N524465839 „Badanie kinematyki powierzchniowych ruchów masowych z wykorzystaniem naziemnej interferometrii radarowej” (2010-2013), a także w projekcie NCBiR realizowanym w ramach I konkursu Wspólnego Przedsięwzięcia RID „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie” (2015-2018).

Możliwości geometryzacji wyników pomiarów georadarowych i zaproponowane przez autora podejście ujawniają swój istotny charakter w analizie danych kolejnego aspektu problemowego.

B. Pomiary georadarowe w rozpoznaniu podłoża gruntowego w budownictwie – przetwarzanie, geometryzacja i modelowanie georadarowego pola falowego.

Zastosowanie metod geofizycznych w procesie rozpoznania podłoża gruntowego w budownictwie wynika z konieczności wstępnego rozpoznania i optymalnego doboru miejsc realizacji badań inwazyjnych, czyli odwiertów i sondowań. Inwestycje budowlane niejednokrotnie prowadzone są na terenach zagrożonych występowaniem deformacji nieciągłych, gdzie dla deformacji powierzchniowych mogą wystąpić zapadliska lub osuwiska (granice poślizgu), a w przypadku deformacji liniowych – progi lub rowy. Zgodnie z wynikami walidacji, które zrealizowano w ramach projektu RID, to metoda georadarowa jest ważnym elementem badań na takich obszarach. Dedykowana jest szczególnie do detekcji płytkich (do kilku metrów p.p.t.) pustek naturalnych i antropogenicznych. Rozróżnienie granic ośrodka w metodzie GPR jest już możliwe, gdy moc odbitego sygnału P_r jest wyrażona zależnością (Annan, 2000; Annan, 2001):

$$P_r = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right)^2 \geq 0,01 \quad (1)$$

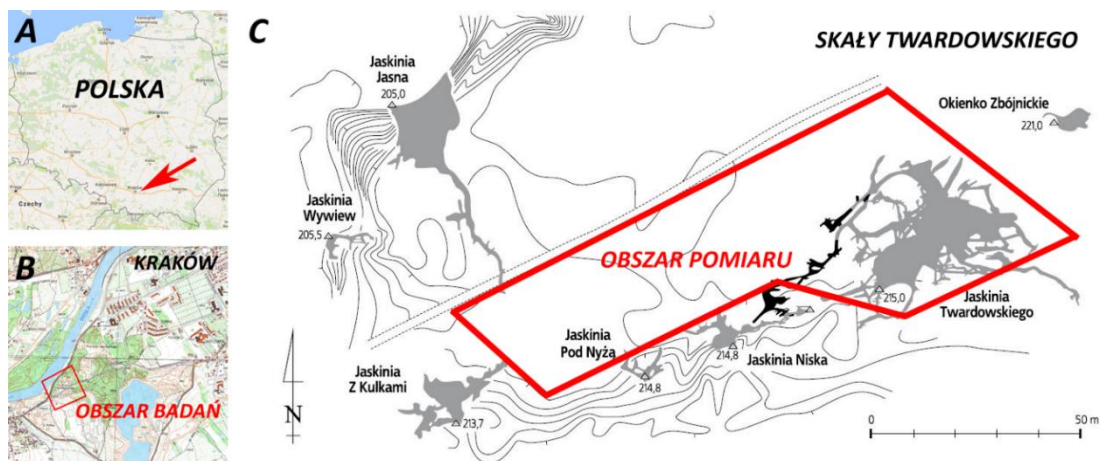
gdzie:

ϵ_{r1} , ϵ_{r2} – względna przenikalność elektryczna sąsiadujących ośrodków.

Im większe zróżnicowanie względnych przenikalności elektrycznych sąsiadujących warstw, tym większa szansa na jednoznaczne odwzorowanie się granicy między nimi. Względna przenikalność elektryczna powietrza ma wartość równą 1 i jest co najmniej 3 krotnie mniejsza od wartości innych ośrodków. Występowanie pustych przestrzeni w formach naturalnych lub antropogenicznych powoduje, iż ich obecność ujawnia się wyraźnie w obrazowaniach georadarowych, szczególnie dla ośrodków o niskiej przewodności elektrycznej, czyli posiadających niski współczynnik tłumienia propagacji fali elektromagnetycznej. Granica dowolnego ośrodka i powietrza będzie więc dużo łatwiejsza w detekcji niż w przypadku zróżnicowanych warstw gruntu, które na granicy mogą się wzajemnie przenikać, skutkiem czego obrazowanie granic będzie niejednoznaczne interpretacyjnie i geometrycznie.

Ze względu na ukierunkowanie badań georadarowych na detekcję pustek naturalnych i pogórnich testy przeprowadziłem w obszarze zrębu Zakrzówek w Krakowie (rys. 5). Badany obszar tworzą głównie wapienie uławicone z krzemieniami. W podłożu wapiennym zachodzi proces krasowienia, którego następstwem są liczne struktury, takie jak zapadliska, leje krasowe oraz jaskinie.

Publikacja nr 3 pod tytułem „*Importance of selecting parameters of georadar profiles in karst area*” podejmuje dyskusję w zakresie określenia wpływu parametrów pomiarowych na jakość zarejestrowanych echogramów w ujęciu jakościowym i ilościowym. Do najbardziej istotnych parametrów pomiarowych należą: ilość próbek sygnału, częstotliwość próbkowania sygnału, składanie (sumowanie) sygnału i odległość pomiędzy trasami.



Rys. 5. Lokalizacja rejonu badań: A) na mapie Polski, B) na planie Krakowa, C) na skalibrowanym planie jaskiń występujących w obszarze południowo zachodniej części parku Skały Twardowskiego (na podstawie Górny, 2007) całość (źródło: publikacja nr 2)

W przywołanej publikacji współrealizowałem pomiary z zastosowaniem dwóch jednostek georadarowych RAMAC/GPR CU II i ProEx System, które posiadają możliwość doboru wszystkich wymienionych parametrów pomiarowych. W ogólności parametrów technicznych obie jednostki nie wykazują znaczących różnic. Różni je czas produkcji na korzyść jednostki ProEx. W obu jednostkach częstotliwość repetycji impulsu wynosi 100 kHz. Aparatury te mają 16 bitowe przetworniki A/D, co daje możliwość rejestracji zmienności amplitudy w przedziale wartości 0 do 65535. Dla jednostki ProEx producent deklaruje poprawę stabilności sygnału w relacji do RAMAC/GPR CU II.

Z dwóch pierwszych parametrów można wyliczyć czas rejestracji sygnału powrotnego, co determinuje potencjalną głębokość penetracji. Częstotliwość próbkowania sygnału wraz z ilością próbek decyduje o długości czasu rejestracji.

Częstotliwość próbkowania sygnału zależy przede wszystkim od częstotliwości anten georadaru. Niezwykle istotnym parametrem jest sumowanie sygnału wpływające na stosunek S/N (sygnał/szum). Wzrost wartości sumowania skutkuje zmniejszeniem prędkości realizacji profilowania, a przewagę wykazuje aparatura ze zwiększonym parametrem PRF (ang. *pulse repetition frequency*). Niektóre jednostki nie umożliwią zmiany tego parametru pracując tak, iż ilość złożeń regulowana jest automatycznie w relacji do prędkości przesuwu aparatury. Jakość zarejestrowanego materiału pomiarowego zależy również od parametru związanego z rozdzielczością Δx pomiarów georadarowych, a ten zależy od częstotliwości i własności dielektrycznych ośrodka zgodnie z zależnością (Annan, 2001):

$$\Delta x = \frac{c}{4 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

gdzie:

c – prędkość fali elektromagnetycznej w próżni,

f – częstotliwość fali propagującej w ośrodku,

ϵ_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka.

Przykładowo, dla anteny o częstotliwości 250 MHz, krok pomiędzy trasami nie powinien być większy niż 10 cm (dla ośrodka o $\epsilon_r = 9$).

Aby skonfrontować wpływ zmienności poszczególnych parametrów wykonano wiele

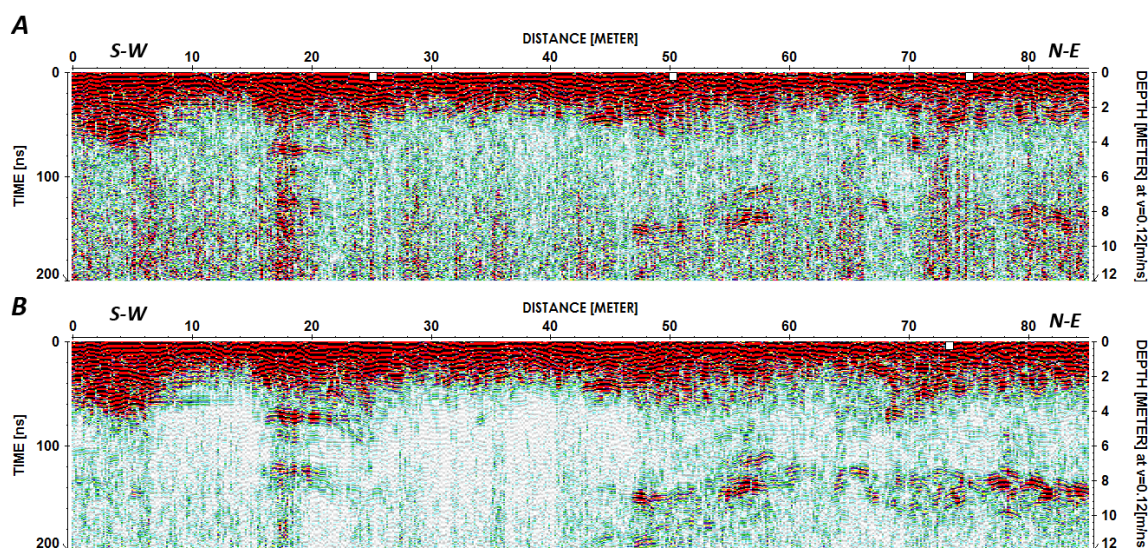
profilowań na jednoznacznym odcinku profilowym (tab. 1) anteną ekranowaną 250 MHz.

Tab. 1. Parametry pomiarowe analizowanych rejestracji (źródło: publikacja nr 3)

Nazwa	Krok [m]	Czas rejestracji [ns]	Ilość próbek	Częstotliwość próbkowania [MHz]	Ilość złożień	Długość profilu [m]	Czas rejestracji [min]
Prof001	0.05	306	508	1655	4	119	3 ½
Prof002	0.05	306	508	1655	64	117	11
Prof003	0.05	148	508	3428	4	119	
Profil2	0.05	306	508	1655	32	86	
Profil3	0.10	306	508	1655	512	85	90
Profil4	0.05	306	508	1655	4	86	

Wszystkie profilowania wykonano dla takiej samej liczby próbek w trasie. Dla zachowania spójności danych poddano je tym samym procedurom filtracyjnym. Dla danych z różną liczbą złożowań obliczono energię wszystkich tras każdego profilu (suma kwadratów amplitud poszczególnych próbek trasy w przedziale od 150 do 508) na materiale przetworzonym jedynie procedurą wyrównania średniego poziomu amplitudy do zera (filtracja DC tzw. usunięcie stałej składowej).

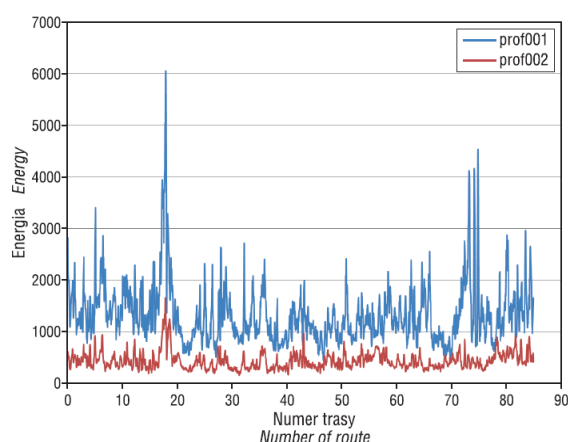
W zakresie pierwszego parametru pomiarowego, jakim jest składanie sygnału, wizualna analiza danych (rys. 6) pozwala na stwierdzenie, że wzrost składania z 4 do 64 znacząco poprawia jakość rejestrowanego materiału pomiarowego. Widoczna na obu echogramach anomalia zarejestrowana od 45 mb końca profilu i głębokości 6 - 8 metra, będąca z dużym prawdopodobieństwem odwzorowaniem jaskiniowej formy krasowej, wyróżnia się jednoznacznie z tła (zdecydowanie obniżony szum) dla danych ze składaniem 64.



Rys. 6. Rejestracje georadarowe przy zastosowaniu różnej wartości składania sygnału A – składanie 4-krotne, B – składanie 64-krotne (źródło: publikacja nr 3)

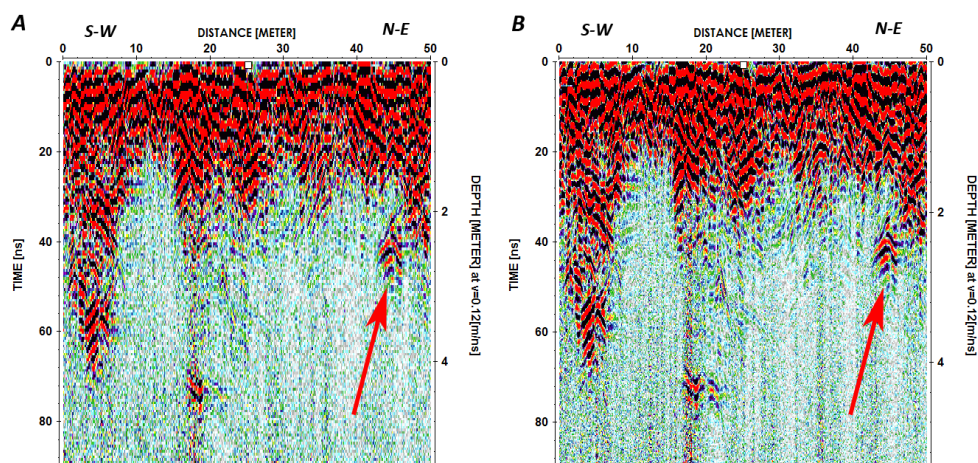
Fakt ten potwierdzono liczbowo poprzez zestawienie energii tras dla profili o złożeniu 4 i 64 (rys. 7). Analizując wykres, zauważa się znacznie niższy średni poziom energii dla tras zarejestrowanych z wysokim składaniem niż dla tras zarejestrowanych z małą liczbą złożowań. Można jednocześnie zaobserwować, że rozrzut energii dla tras o wysokim składaniu jest znacznie mniejszy. Lokalne maksimum na 18 mb profilu jest związane z anomalią pochodzącą

od struktury o pionowym przebiegu (rys. 6). Wyniki liczbowe uzyskane dla złożenia 512 jeszcze bardziej obniżają średni poziom energii. Nie prezentowano ich graficznie na wykresie, aby go nie zaciemniać, natomiast graficznie efekt ten będzie zaprezentowany w kolejnej omawianej publikacji (rys. 10F).



Rys. 7. Wykres estymacji energii tras dla profili prof001 (4 złożenia) i prof002 (64 złożenia) (źródło: publikacja nr 3)

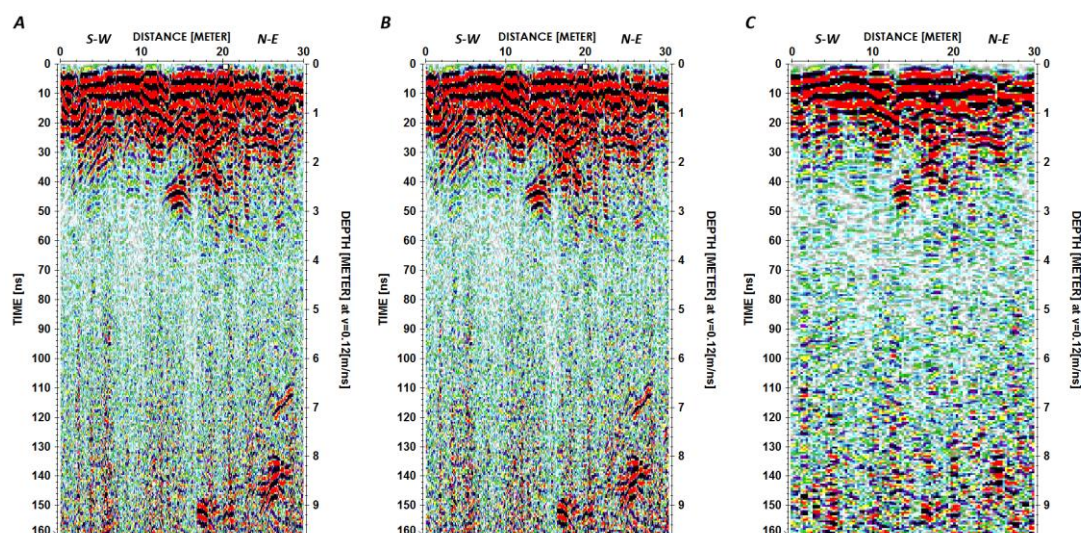
W zakresie zmiany częstotliwości próbkowania sygnału w omawianej publikacji przedstawiono echogramy, które zarejestrowano przy częstotliwości 6-krotnie i 12-krotnie wyższej od częstotliwości środkowej anteny (rys. 8). Echogramy przetworzono identycznie bez stosowania filtracji częstotliwościowej, aby nie rugować wyższych częstotliwości sygnału ze względu na znacznie wyższą niż standardowa częstotliwość próbkowania podczas pomiarów. Wizualna ocena materiału pomiarowego wskazuje na nieznaczny wzrost jakości zobrazowania odwzorowywanych anomalii.



Rys. 8. Porównanie dwóch rejestracji, na których zastosowano różne częstotliwości próbkowania sygnału: A) $f = 1655$ MHz, B) $f = 3428$ MHz; strzałką wskazano anomalię na obu echogramach (źródło: publikacja nr 3)

Ostatnia przedstawiona analiza dotyczy znaczenia doboru odległości między trasami (A-skanami). Na bazie terenowego materiału pomiarowego zarejestrowanego z krokiem pomiarowym 0,05 m, czyli 2-krotnie mniejszym niż maksymalnie możliwy, wygenerowano obraz z interpolacją tras co 0,025 m oraz 0,3 m, czyli 3-krotnie większą od minimalnej zalecanej. Tym samym zasymulowano sytuację terenową, a wynik przedstawia rysunek 9.

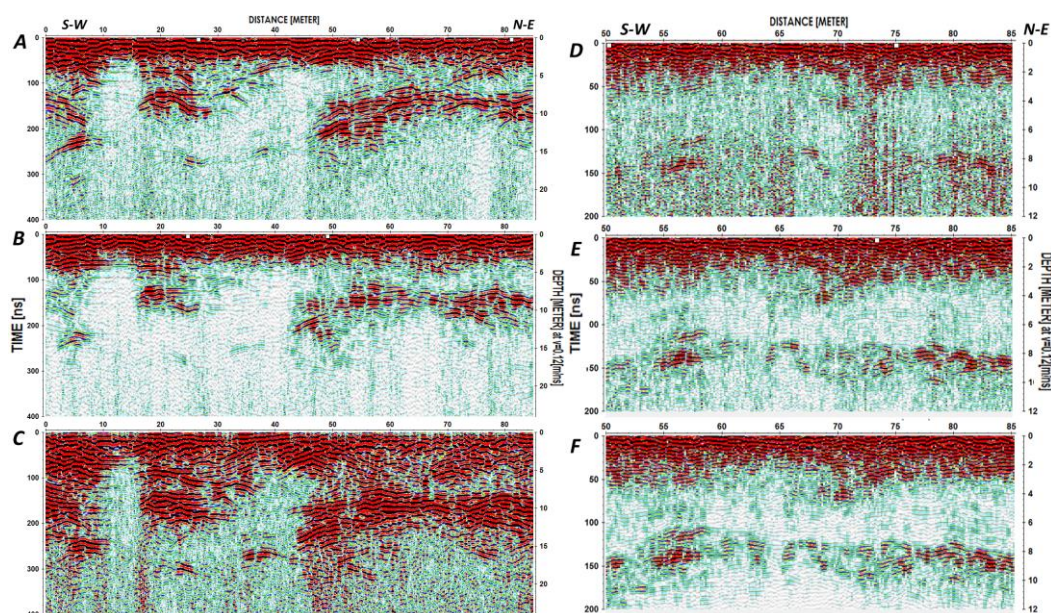
Proces interpolacji nie spowoduje wzrostu informacji użytecznej – jest to prosta operacja matematyczna, która na podstawie wartości w punktach wylicza wartości pośrednie różnymi algorytmami. Jak można zauważyć zbyt mały krok nie powoduje znaczącego zniekształcenia anomalii, ale będzie wydłużać czas pomiaru. Z kolei przyjęcie zbyt dużego kroku pomiarowego może skutkować zmniejszeniem uszczegółowienia rozdzielczości poziomej rejestracji (rys. 9C). Szczególnie wyraźne jest to w dolnej części echogramów pokazanych na rysunkach 9B i 9C.



Rys. 9. Fragmenty tej samej rejestracji pokazane z różnym krokiem pomiarowym:
A) 0,025 m, B) 0,05 m, C) 0,3 m. (źródło: publikacja nr 3)

Publikacja nr 4 pod tytułem „*Importance of selecting parameters of georadar profiles in karst area*” jest dopełnieniem publikacji nr 3 i prezentuje znaczenie doboru różnych częstotliwości anten i ich rozwiązań konstrukcyjnych na efektywność rozpoznania podłoża gruntowego w budownictwie.

Pomiary zrealizowano w tym samym obszarze i na tej samej linii profilowej. Konfrontacji i analizie poddano pomiary zarejestrowane za pomocą anten ekranowanych o częstotliwości 250 MHz oraz 100 MHz o różnych konstrukcjach (ekranowana, nieekranowana, RTA – ang. *Rough Terrain Antenna*). Wszystkie anteny są dipolowe, ale anteny ekranowane to konstrukcja typu muszka (ang. *bow-tie*), nieekranowane to prawdopodobnie dipol gruby lub rombowy, a RTA to na pewno dipol o orientacji równoległej do kierunku profilowego, czyli odmienny względem dwóch pozostałych typów. Zmienność konstrukcyjna to też zmienność charakterystyk promieniowania, zysku kierunkowego i energetycznego, sprawności itd. (Karczewski i in., 2011). To właśnie konfrontacja tak wielu rozwiązań konstrukcyjnych jednego producenta w jednym obszarze badawczym jest znamiennym wkładem publikacji w zakresie zdefiniowanego problemu. Parametry pomiarowe dla anteny 250 MHz podano w tabeli 1, natomiast dla anten 100 MHz pomiary zrealizowano z krokiem pomiarowym 0,1 m, czasem nasłuchu 600 ns, przy 750 próbkach rejestrowanych z częstotliwością 1200 MHz. Przetworzenie echogramów zrealizowano z zachowaniem tych samych procedur cyfrowego przetwarzania sygnału georadarowego. Konfrontacyjne zestawienie wyników zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 10. Echogramy zarejestrowane różnymi antenami: A) 100 MHz nieekranowana, B) 100 MHz ekranowana, C) 100 MHz RTA, D) 250 MHz ekranowana, liczba złożów 4, E) 250 MHz ekranowana, liczba złożów 62, F) 250 MHz ekranowana, liczba złożów 512. (źródło: publikacja nr 4)

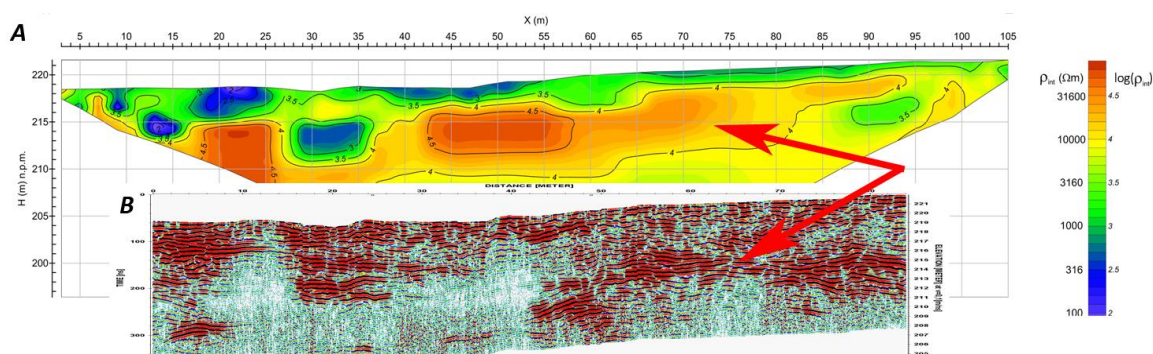
Wyniki wszystkich typów anten o częstotliwości 100 MHz korelują ze sobą, niemniej jednak wykazano, że zdecydowanie najlepszy rezultat można zaobserwować na echogramie uzyskanym za pomocą anteny RTA (rys. 10C), która najefektywniej wyróżnia rozkład struktur podpowierzchniowych i wykazuje największy zasięg. Najslabiej w tym rankingu wypada antena ekranowana, która co prawda dostarcza obraz o małej ilości szumu, ale widać, iż przy zastosowanych parametrach sygnał rejestrowany jest najslabiej. Na rysunku 10D, 10E, 10F pokazano rejestracje uzyskane przy pomocy anteny ekranowanej o częstotliwości 250 MHz i różnej liczbie złożów sygnału (por. tab. 1). Analiza porównawcza pozwala stwierdzić, że składanie 64-krotne, a przede wszystkim 512-krotne powoduje znaczącą poprawę stosunku S/N, co jest graficznym potwierdzeniem obliczeń przywołanych we wcześniejszej publikacji.

Trzecia publikacja w tym obszarze to przywołana już w punkcie A **publikacja nr 2** pod tytułem **„Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową”**.

Publikacja ta jest głosem w szerokiej dyskusji dotyczącej skuteczności i stosowania metod geofizycznych, szczególnie georadarowej, w obszarze rozpoznania i mapowania zmian struktury podłoża gruntowego. Rozważania prowadzono w odniesieniu do form krasowych na przykładzie jaskini jako jednorodnej materiałowo formie podpowierzchniowej. Znaczącym wkładem w obszar poszerzenia wiedzy z tego zakresu jest ocena skuteczności procedur filtracyjnych dedykowanych uwiarygodnianiu geometrii i uczytelnianiu treści echogramów. Poruszyłem również aspekt korelacji wyników modelowania prowadzonego w oparciu o kształt pustki pozyskany techniką (TLS) z danymi GPR z pomiarów rzeczywistych. Ważny aspekt publikacji to modelowanie pola falowego metodą FDTD i przetworzenia danych GPR skonfrontowane bezpośrednio z chmurami punktów reprezentującymi jaskinię.

Mój kierunek dociekań wynikał z faktu, że w przypadku płytkich pustek podpowierzchniowych metoda georadarowa wykazuje przewagę nad innymi metodami geofizycznymi. Potwierdzeniem przywołanego faktu są wyniki pozyskane w ramach badań polowych realizowanych w projekcie RID na wspomnianym obszarze zrębu Zakrzówka. Wyniki z metody GPR wskazują na istnienie struktur, które nie ujawniają się w zapisie z metody ERT

(rys. 11). Ponieważ wyniki pozyskano w obszarze rozpoznanych zjawisk krasowych, nie ma wątpliwości co do genezy tych anomalii w zapisie GPR.



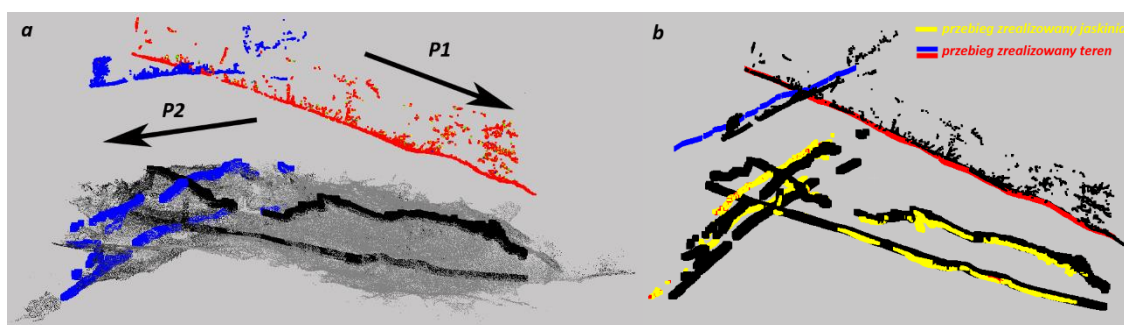
Rys.11. Polygon badawczy 11–Z: A) wynik sondowań ERT (wyk. i oprac. J. Mościcki, G. Bania, AGH), B) wynik profilowań GPR (aparatura Mala Geoscience ProEx System, antena ekranowana 100 MHz – wyk. i oprac. Ł. Ortyl, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, AGH) (źródło: publikacja nr 2)

Przywołany przykład ujawnia skuteczność reakcji metody GPR na zmienność podłoża w obszarze detekcji form krasowych. Postawiłem pytanie o zakres informacji, którą uzyskuje się na podstawie echogramu GPR w takim przypadku, mianowicie czy obraz z badania GPR informuje jedynie o zmienności struktury ośrodka, czy może pozwala także na określenie położenia stropu i spągu pustki. Jeżeli tak, to w jakich warunkach możliwa jest detekcja konturów dla takich form.

Dla rozstrzygnięcia tych pytań przeprowadziłem obszerny eksperyment badawczy. Prace badawcze szeroko opisane w omawianej publikacji przeprowadzono w obszarze Jaskini Twardowskiego i jej bezpośrednim sąsiedztwie. Obiekt badań to sala główna jaskini krasowej o wysokości do 3 metrów, głębokość zalegania to 3 do 7 metrów pod powierzchnią terenu. Jaskinia w swej głównej części jest dobrze rozpoznana a z punktu widzenia zaplanowanych badań ma tę zaletę, iż posiada łatwy dostęp do głównej sali (PIG-PIB, 2013). Terenowe prace badawcze zrealizowałem z optymalną do tych warunków anteną ekranowaną o częstotliwości 250 MHz, której parametry są kompromisem pomiędzy teoretycznym zasięgiem a rozdzielczością pomiaru, które w tym eksperymencie miały kluczowe znaczenie. Teoretyczne wyliczenia związane z rozdzielczością pomiaru, które przedstawiłem w omawianej publikacji wskazują wyraźnie, że w ośrodku wapiennym dla częstotliwości 250 MHz szacowana rozdzielczość jest rzędu 10 cm, a dla powietrza – 30 cm, co oznacza, że wybrana forma jaskiniowa powinna odwzorować się jednoznacznie w zapisie georadarowym. Daje to podstawę do dalszych przekształceń danych georadarowych w aspekcie geometrycznym.

Relację geometryczną terenu i sali głównej pozyskałem poprzez realizację pomiarów technologią skanowania laserowego z zachowaniem wszelkich procedur geodezyjnych, pozyskując chmurę punktów z szacowaną dokładnością na poziomie decymetra. Na bazie informacji geometrycznej o położeniu i kształcie sali jaskini zaprojektowałem i wytyczyłem w terenie przebiegi dwóch profili, które przebiegały prostoliniowo, ale w rejonie największych różnic wysokości pomiędzy stropem a spągiem (rys. 12a). Na zaplanowanych profilach wykonałem profilowania georadarowe z zastosowaniem georeferencji bezpośredniej systemem GPR-TCA (ProEx Mala – Leica MS50). Opisana metodyka działań spowodowała, iż pozyskane dane georadarowe i chmurę punktów reprezentującą salę jaskini sprowadzono do jednego układu współrzędnych PL-2000, co daje wysoko precyzyjny materiał wyjściowy dla ich przestrzennej konfrontacji. Rzeczywisty przebieg zrealizowanych profili ze względu na warunki

terenowe nieznacznie odbiega od przebiegu planowanego (rys. 12b).



Rys. 12. Przebieg profilowań georadarowych, widok terenu i przekrój przez jaskinię: a) planowany, b) zrealizowany (źródło: publikacja nr 2)

Przestrzenna relacja danych georadarowych i geometrycznego kształtu sali głównej pozwoliła na przeprowadzenie istotnych analiz w zakresie skuteczności poszczególnych procedur filtracyjnych oraz ich parametrów i kolejności stosowania. Analiza nad doбором procedur przebiegała wieloetapowo i iteracyjnie.

Podam przykłady wpływu kolejności stosowanych procedur i efektywności ich działania. Skonfrontowałem działania filtrów 2D (odjęcie średniej trasy – *background removal*, średnia pełzająca – *subtracting average*) i filtru dwuwymiarowego w dziedzinie częstotliwości – *fk filter*, wskazując na ograniczenie tego ostatniego w obszarze eliminacji wielokrotnych refleksów poziomych.

Skonfrontowałem również między sobą działanie filtrów wzmacniających: *EnergyDecay*, *AGC*, *Gain function*, wskazując przewagę filtracji *AGC*. Zweryfikowano przetwarzanie z zastosowaniem procedury migracji (Stolta, Kirchhoffa, topograficznej) i dekonwolucji spikowej.

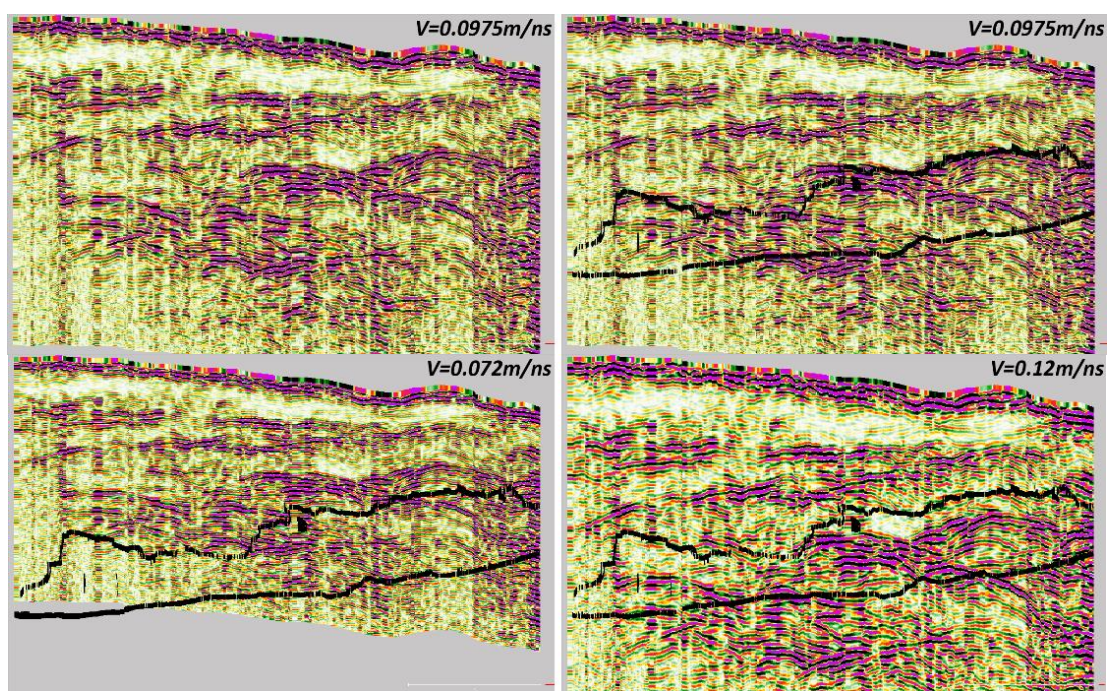
Realizując różne kombinacje filtrów, za najwłaściwszą sekwencję optymalną uznałem następującą kolejność procedur:

- przesunięcie pierwszego wstąpienia do poziomu zerowego (*move start time*),
- dekonwolucja spikowa,
- wyrównanie średniego poziomu sygnału do zera (*subtract-DC-shift*),
- usunięcie składowej niskoczęstotliwościowej (*subtract-mean (dewow)*),
- usunięcie refleksów poziomych – odjęcie średniej trasy (*backgroundremoval*),
- usunięcie refleksów poziomych – średnia pełzająca,
- wzmacnienie sygnału *AGC*,
- filtracja częstotliwościowa (*bandpassbutterworth*),
- wygładzanie (*average xy-filter*),
- migracja topograficzna.

Konfrontacja danych georadarowych z geometryczną reprezentacją sali jaskini (chmura TLS) wymaga odpowiedniego skalowania głębokościowego dla danych georadarowych. Teoretyczne wartości prędkości fali w skale wapiennej kształtują się w przedziale 0,09 m/ns÷0,12 m/ns (Karczewski i in., 2011). Bezpośrednio w terenie do określenia prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w badanym ośrodku stosuje się profilowanie prędkości WARR (Wide Angle Reflection and Refraction) lub CMP (Common Mid-Point) (Pasternak, 2015). W bliskim sąsiedztwie Jaskini Twardowskiego wykonano profilowania prędkości WARR i CMP. W oparciu o 28 punktów charakteryzujących przebieg hiperboli wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów estymowaną wartość prędkości, która dla

metody WARR wyniosła 0,072 m/ns, a z metody CMP (20 punktów) wyniosła 0,082 m/ns (Ortyl i in., 2017).

Na podstawie bezpośredniego, iteracyjnego dopasowania danych UgRS i TLS wykazałem rozbieżność prędkości fali w ośrodku nad jaskinią względem wyników pozyskanych metodą profilowania prędkości CMP (0,072 m/ns). Najlepsze dopasowanie oparto o kryterium zbieżności maksymalnej wartości pozytywnej polaryzacji sygnału reprezentującego odbicie od stropu przez analogię do polaryzacji sygnału granicy między gruntem a przewodami z tworzywa sztucznego. Kryterium to wynika z doświadczeń prowadzonych przez autora z zastosowaniem anten 250 MHz firmy Mala GeoScience (Ortyl, 2007b). Najlepsze dopasowanie uzyskałem dla przyjętej prędkości fali 0,0975 m/ns, przy której dla danych terenowych jednoznacznie uwidacznia się i koreluje głębokościowo i geometrycznie przebieg stropu sali głównej jaskini. Różnica względem wyników ze standardowej metody CMP wyniosła 0,0255 m/ns i stanowi punkt wyjścia dla osobnej analizy zaistniałego zjawiska (rys. 13).



Rys. 13. Prezentacja relacji między przekrojem jaskini (chmurą TLS – kolor czarny) a echogramem (chmurą UgRS) przy zadanych różnych prędkościach; lewy górny rysunek prezentuje celowo dane UgRS bez przekroju jaskini (źródło: publikacja nr 2)

Wskazanie stropu na echogramie wsparte przez dane TLS jest dość jednoznaczne. Należy jednak zaznaczyć, że bez materiału kalibracyjnego TLS kalibracja głębokościowa i identyfikacja stropu są znacznie utrudnione i obarczone dużą niepewnością na etapie interpretacji. Natomiast wskazanie spągu jest obciążone bardzo dużą niepewnością, a w zasadzie niemożliwe bez dodatkowej analizy z pomocą danych TLS.

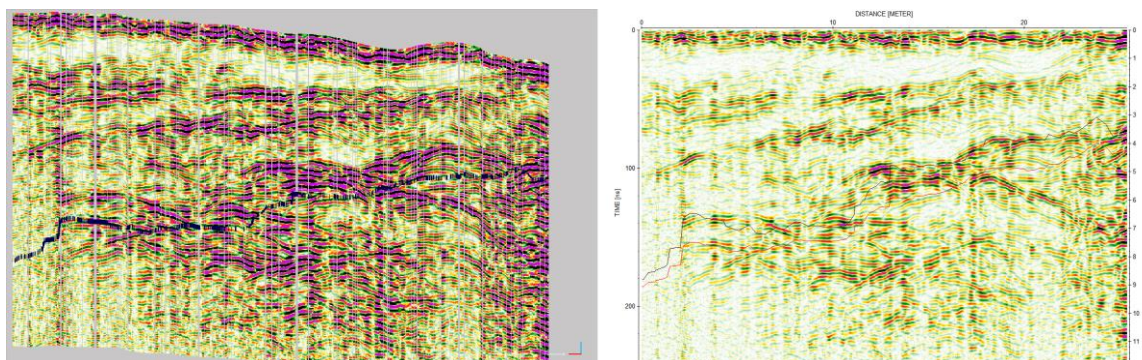
Sytuacja jest dość zaskakująca, gdyż teoretyczna rozdzielczość pionowa daje podstawę sądzić, że potencjalnie strop i spąg dla pustki o 3-metrowej wysokości powinny być dość jednoznacznie widoczne w obrazie pozyskanym anteną o częstotliwości 250 MHz. Możliwe, iż przyczyny niejednoznaczności należy upatrywać w rozdzielczości poziomej i oddziaływaniu zjawiska Fresnela, które negatywnie wpływają na odwzorowanie się spągu.

Przeprowadziłem dalszą analizę z wykorzystaniem danych TLS w celu oceny wskazania, gdzie w zarejestrowanym obrazie należy lokalizować spąg. Wykorzystałem i skonfrontowałem

ponownie dane UgRS i TLS. Wymagało to dodatkowych zabiegów obliczeniowych, dlatego:

- dokonałem generalizacji chmury punktów TLS do postaci wektorowej dla stropu i spągu jaskini,
- wyznaczyłem (w oparciu o współrzędne X, Y, Z węzłów wektorów) wartość różnicy wysokości pomiędzy spągiem a stropem,
- zredukowałem różnicę wysokości pomiędzy spągiem a stropem z uwzględnieniem faktu zmiany prędkości propagacji fali między ośrodkiem skalnym i powietrzem – współczynnik redukcji wyniósł 0,325 (0,0975/0,3),
- wygenerowałem wektor będący różnicą wektora stropu i zredukowanej różnicy wysokości pomiędzy spągiem a stropem; wektor ten odniesiono do danych UgRS przy prędkości 0,0975 m/ns.

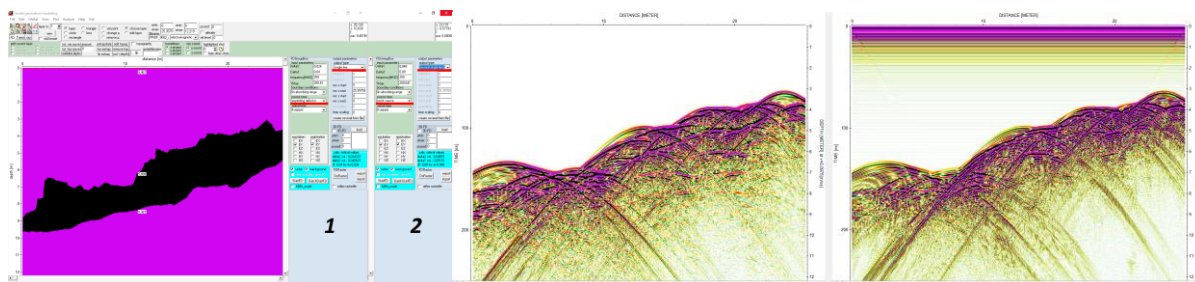
Wynik relacji rzeczywistego przebiegu spągu w danych georadarowych przedstawiono na rysunku 14. Jest to bardzo istotny rezultat analiz, ze względu na konfrontację zależności teoretycznych metody z wynikiem finalnym rzeczywistych badań. Analizując rysunek 14 można zauważyć słabe wyróżnienie się spągu na echogramie. Co zaskakujące to w głębszych partiach jaskini pojawia się refleks liniowy korelujący z rzeczywistym przebiegiem.



Rys. 14. Przebieg wektora wskazującego miejsce, gdzie w obrazie georadarowym powinien odwzorować się spąg na danych UgRS (po lewej) i w programie do przetwarzania danych GPR (po prawej – linia czerwona)
(źródło: publikacja nr 2)

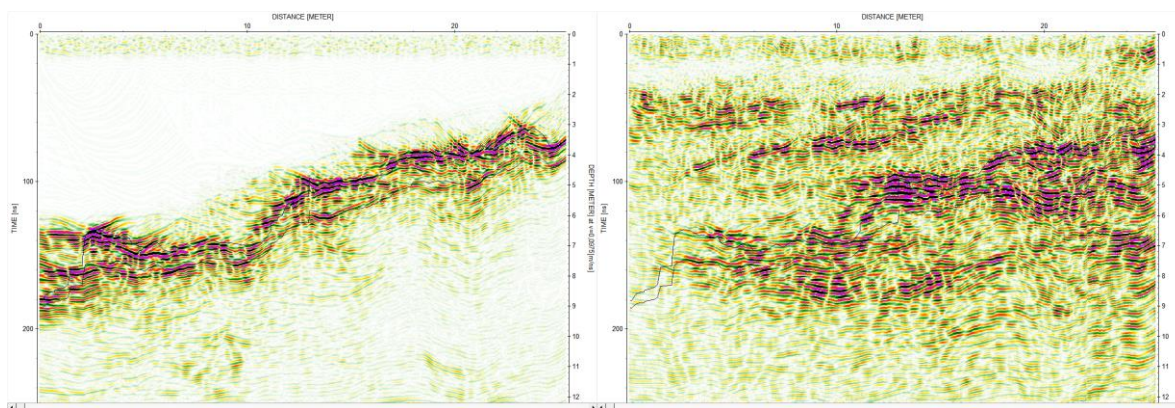
Aby głębiej przeanalizować wpływ geometrii pustki na zapis obrazu jaskini na echogramie, przeprowadziłem modelowanie danych metodą FDTD.

Proces modelowania propagacji sygnału wymaga wektorowej reprezentacji geometrii warstw przestrzeni propagacji i podania zakładanych prędkości fali w poszczególnych strukturach. Wektorowa reprezentacja granic warstw stropu i spągu powstała na bazie generalizacji przebiegu warstw, którą opisano powyżej. Prędkość w wapieniu przyjęto z najlepszego wpasowania, czyli 0,0975 m/ns, a przewodność na poziomie 0,001 S/m (Pasternak, 2015). Podczas rozwiązywania układu równań Maxwella uwzględniłem dwa rodzaje źródeł sygnału i odpowiednich parametrów tworzenia siatki modelu (rys. 15a). Modelowanie przeprowadziłem dla źródeł fali: eksplodująco-odbijającego z opcją pojedynczego profilu (1) oraz punktowego z opcją stworzenia wielu profili (2).



Rys. 15. Modelowanie metodą FDTD a) widok geometrii przekroju jaskini i zestawienie parametrów brzegowych dla modelowania rozkładu pola elektromagnetycznego, b) wynik modelowania (źródło fali: 1, 2) bez filtracji (źródło: publikacja nr 2)

Dane modelowe i terenowe poddałem wzajemnej konfrontacji. Wymagało to poddania danych modelowych takim samym procedurom filtracyjnym. W danych modelowych silnie ujawniają się hiperbole dyfrakcyjne (rys. 15b). Wymusiło to konieczność wprowadzenia procedury dekonwolucji i migracji (szczególnie topograficznej) oraz weryfikacji w zakresie kolejności ich stosowania i wpływu na geometrię, co też szeroko opisałem i udokumentowałem w publikacji (rys. 16).



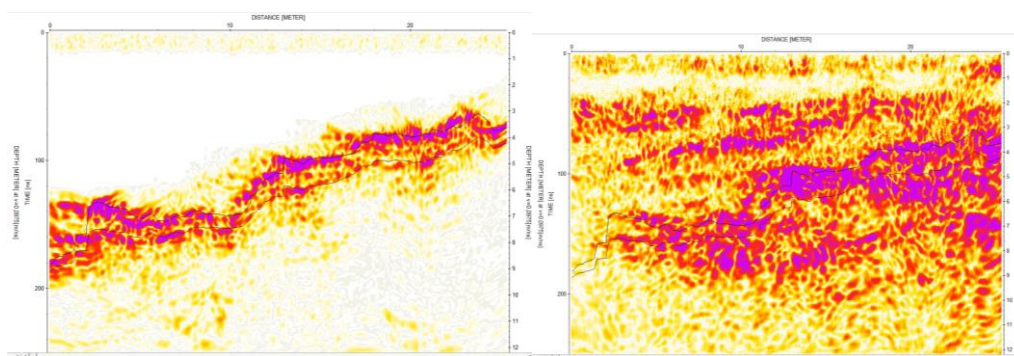
Rys. 16. Wynik działania całej podanej sekwencji filtracji: model 2 (po lewej), dane terenowe (po prawej) (źródło: publikacja nr 2)

Wykazałem, że wyznaczenie przebiegu spągu dla danych modelowych jest możliwe, ale sygnał odbity reprezentujący spąg jest znacznie słabszy, zwłaszcza w strefie płytszego zalegania. Efekt ten koreluje również z danymi terenowymi, gdzie w warstwie głębszego zalegania jaskini widać zbieżność danych.

Na koniec przetworzeń filtracyjnych zastosowałem procedurę *envelope*, czyli analizy amplitudy chwilowej sygnału. Obliczenia przeprowadzane są w oparciu o transformatę Hilberta (Karczewski i in., 2011). W ogólności efektem działania procedury jest generalizacja treści echogramów w taki sposób, aby lepiej wydobyć miejsca nagromadzenia silnych sygnałów, bez podziału na wartości dodatnie i ujemne amplitudy (rys. 17).

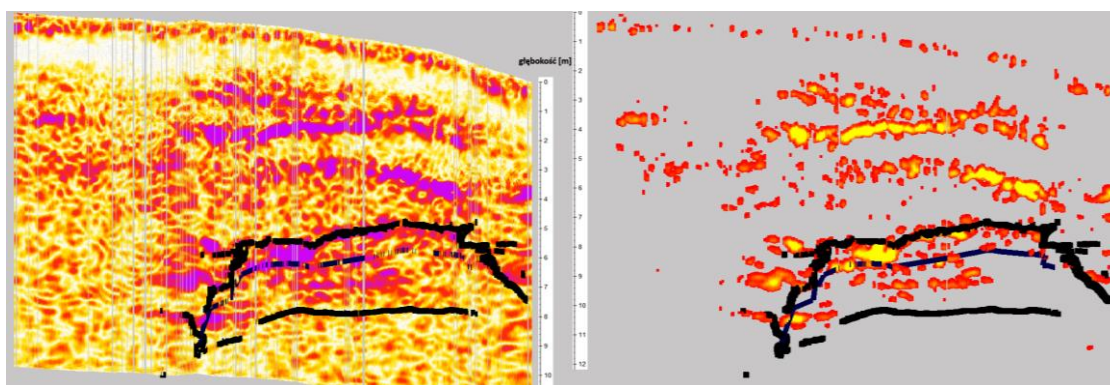
Uzyskany wynik dla danych modelowych wskazuje na fakt zdecydowanej różnicy energii amplitudy odbitej od spągu w porównaniu z odbiciem od stropu jaskini. Efekt ten jeszcze silniej ujawnia się dla danych terenowych. Mimo iż teoretycznie spąg powinien być ujawniony, to jednak jest bardzo słabo widoczny, a wręcz nieinterpretowalny jako granica. Na uwagę zasługuje fakt, który ujawnia się w danych terenowych głębszej części jaskini, gdzie rozdział tych dwóch warstw jest lepiej widoczny niż w odcinku płytszym mimo podobnej wysokości pustki. Tym samym analizom poddałem profil poprzeczny, który potwierdził

przedstawione wnioski.



Rys. 17. Wynik działania procedury envelope na modelu 2 (po lewej) i danych terenowych (po prawej) (źródło: publikacja nr 2)

Cennym elementem końcowym pracy jest wskazanie, kolejnych możliwości i zalet przekształcenia danych GPR do UgrS. Można na nich przeprowadzić procedury typowe dla danych TLS i selektywnie dokonać filtracji danych reprezentujących silne refleksy (rys. 18). Stosując taką metodykę na kilku echogramach, łatwo uzyskać z danych UgrS przestrzenny model anomalii zlokalizowanej georadarem.



Rys. 18. Zestawienie danych UgrS dla profilu poprzecznego po pełnych przetworzeniach i procedurze *envelope* (po lewej), filtr progowy na amplitudzie danych UgrS (po prawej). (źródło: publikacja nr 2)

Podsumowując, ta bardzo obszerna publikacja jest znamieną pozycją, gdyż przedstawia i szeroko dokumentuje sekwencję procedur przetwarzania filtracyjnych, która może być traktowana jako wyjściowa nie tylko w zakresie krasu, ale ogólnie w przetwarzaniu danych georadarowych pozyskiwanych podczas rozpoznania podłoża gruntowego w budownictwie.

Niezwykle istotny jest fakt wykazania dużych możliwości i ograniczeń modelowania, które co prawda pomagają w interpretacji, ale z przedstawionych danych widać, że w zakresie tak złożonych form naturalnych korelacja efektów modelowania i rzeczywistych wyników jest dość rozbieżna.

Wykazałem niezaprzeczalną przydatność niestandardowego podejścia do danych GPR poprzez ich konwersję do postaci UgrS zaproponowanym algorytmem. Udowodniłem, iż traktowanie ich jako chmury punktów podnosi użyteczność danych georadarowych i daje łatwą konwersję poza standardowe oprogramowanie geofizyczne.

C. Pomiary georadarowe w inwentaryzacji drogowych obiektów inżynierskich wraz z modelowaniem georadarowego pola falowego

Jednym ze znaczących obszarów inżynierii lądowej jest budownictwo drogowe, gdzie metody nieniszczące ugruntowują swoje znaczenie w diagnostyce konstrukcji nawierzchni drogowych i obiektów mostowych. Publikacją wpisującą się w to zagadnienie jest pozycja pod tytułem „*Assessing of the effect of selected parameters of GPR surveying in diagnosis of the condition of road pavement structure*”. Jest to trzecia publikacja autora poświęcona tej tematyce. W poprzednich analizowałem możliwości i ograniczenia metody, jej dokładności, metodykę pomiarów i sposoby przetwarzania oraz ich geometryzacji (Ortyl, 2007a; Ortyl, 2009), po czym przeszedłem do kwestii optymalizacji pozyskiwania danych GPR, jakości wizualnej i liczbowej echogramów. Problematyka koresponduje z publikacjami 3 i 4 cyklu, ale w tematyce budownictwa drogowego zdecydowanie zmienia się struktura obiektu badań i zakres używanych częstotliwości fali elektromagnetycznej, który z wartości poniżej 500 MHz dla podłoża wkracza w obszar powyżej tej wartości i dotyczy problematyki inwentaryzacji obiektów inżynierskich.

W artykule przedstawiłem kolejne wyniki prac testowych, które wykonałem georadarem na nowo budowanym odcinku trasy drogowej. Na nowym odcinku nie ujawniają się żadne dodatkowe czynniki (np. zasolenie) wpływające na jakość i obniżające skuteczność rozpoznania warstw konstrukcji. Celem badań była jakościowa i ilościowa ocena relacji pomiędzy detekcją, wyznaczaniem grubości warstw konstrukcji nawierzchni drogowych w zależności od wybranych parametrów sondowań georadarowych przez zastosowanie zestawu georadaru RAMAC/GPR jednostka CU II i ProEx oraz anten różnych częstotliwości.

Plan eksperymentu zakładał wielokrotne wykonanie profilu georadarowego na wytypowanym podłużnym odcinku o długości 10 m w kontekście dwóch zagadnień:

- Zmiany parametrów pomiarowych a jakość wyników rejestrowanych radargramów.
- Pomiar z zastosowaniem dwóch różnych jednostek radarowych i różnych anten ekranowanych o tej samej częstotliwości środkowej, ale dostarczonych z poszczególnymi jednostkami centralnymi.

W pierwszym zagadnieniu pomiarowym (Z1) profile wykonałem georadarem RAMAC/GPR jednostką CU II, anteną ekranowaną 1000 MHz. Zrealizowano następujące sekwencje pomiarowe:

- przy zmiennych wartościach częstotliwości próbkowania (10779 MHz, 15399 MHz, 20523 MHz) i stałej liczbie złożań 8) – oznaczone w dalszej części jako S1,
- przy stałej częstotliwości próbkowania (10779 MHz) oraz zmiennej ilości złożań i zmiennym kroku rejestracji śladów radarowych (liczby złożań: 2, 4, 4, 8, 16 z krokiem 1cm, 16 z krokiem 4 cm, 32 z krokiem 10 cm) – oznaczone w dalszej części jako S2.

W drugim zagadnieniu pomiarowym (Z2) profile wykonałem radarem RAMAC/GPR jednostką CU II i ProEx. Zrealizowano następujące sekwencje pomiarowe:

- pomiar jednostką CU II z antenami z zestawu CU II (cu1000 MHz, cu800 MHz, cu500 MHz),
- pomiar jednostką CU II z antenami z zestawu ProEx (pro500 MHz, pro800 MHz),
- pomiar jednostką ProEx z antenami z zestawu ProEx (pro800 MHz).

Opracowanie i analiza pozyskanego materiału pomiarowego obejmowała następujące etapy:

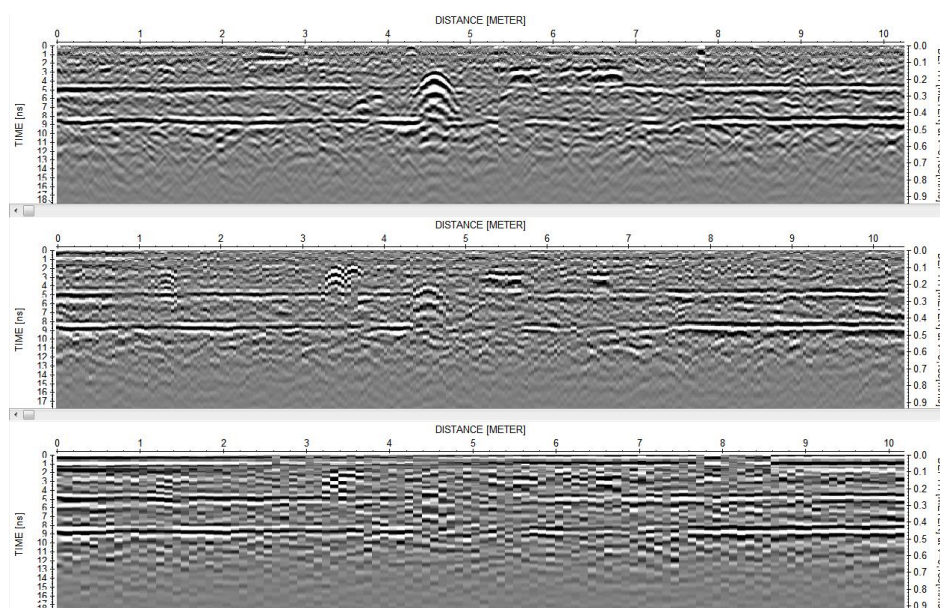
- filtrację echogramów,
- jakościową ocenę materiału pomiarowego w zakresie detekcji poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni drogi,
- wektoryzację warstw celem pozyskania danych liczbowych o czasie i amplitudzie sygnału reprezentującego granicę pomiędzy rozpoznanymi warstwami,
- opracowanie podstawowych statystyk pozyskanych danych liczbowych.

Przetworzenie echogramów zrealizowałem z zachowaniem jednakowej procedury filtracji. Na bazie przeprowadzonego eksperymentu wyciągnąłem kilka wniosków o charakterze ogólnym.

Pomiar z poziomu warstwy wiążącej i zastosowane konfiguracje sprzętowe jednoznacznie umożliwiają rozpoznanie i analizę przebiegu granicy pomiędzy warstwą betonowego BA 22 i kruszywa łamanego o uziarnieniu ciągłym 0/31,5 mm i granicy pomiędzy warstwą kruszywa łamanego o uziarnieniu ciągłym 0/31,5 mm a kruszywa o CBR > 60%. Jest to możliwe i powtarzalne bez względu na analizowane parametry pomiarowe, anteny i jednostkę centralną, które wykorzystywano w badaniach.

Zmiana częstotliwości próbkowania sygnału (10779 MHz, 15399 MHz, 20523 MHz) w pomiarach realizowanych anteną 1000 MHz nie przekłada się w sposób znaczący na jakościowy i ilościowy wynik dotyczący powtarzalności czasu rejestracji i amplitudy sygnału reprezentującego rozpoznane granice warstw.

Zmiana liczby złożeń sygnału i kroku pomiarowego wg ustalonej sekwencji w pomiarach realizowanych anteną 1000 MHz nie przekłada się znacząco na jakościowy i ilościowy wynik powtarzalności dotyczący czasu rejestracji i amplitudy sygnału reprezentującego rozpoznane granice warstw. Należy zaznaczyć, że w przypadku rozrzedzenia kroku pomiarowego do 10 cm (liczba złożeń 32) materiał pomiarowy nadal umożliwia poprawne rozpoznanie granic warstw i pozwala wyróżnić charakter zaburzenia ich ciągłości. Utracona natomiast pozostaje informacja o zaburzeniach ujawniających się w postaci hiperbol (rys. 19). Przy tak dobranych parametrach ilościowy wynik pomiaru zostaje nadal zgodny z pomiarem o interwale 1 cm, mimo że danych pomiarowych z kroku 10 cm pozostało jedynie 10% w stosunku do danych z kroku 1 cm.

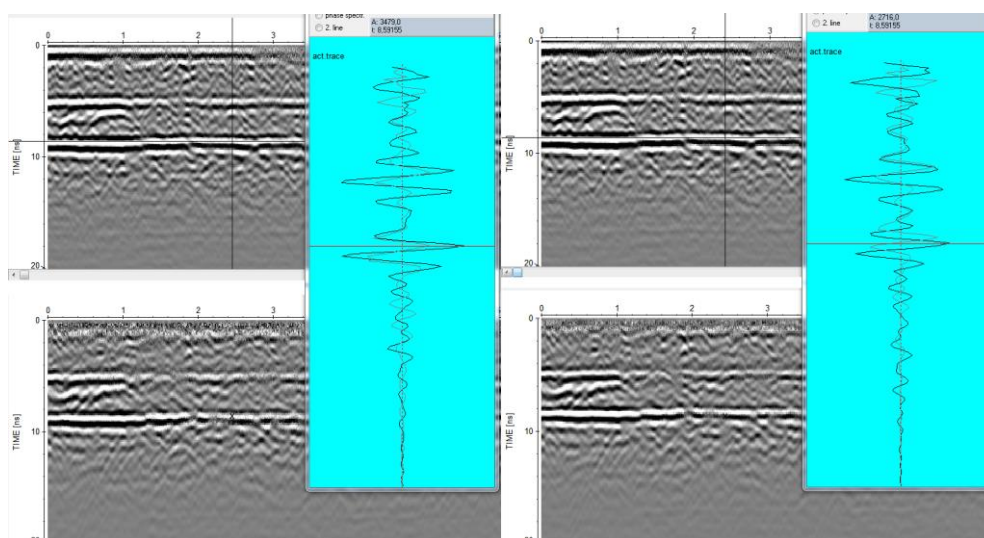


Rys. 19. Echogramy - zagadnienie pomiarowe Z1 - sekwencja S2) : liczba złożeń: 16, krok 1 cm (górze); liczba złożeń: 16, krok 4 cm (środek), liczba złożeń 32, krok 10 cm (dół) (źródło: publikacja nr 5)

Z rozważań teoretycznych wynika, że wartość S/N rośnie wraz z pierwiastkiem liczby złożeń, co oznacza, że dla wartości 16 złożeń S/N będzie 3 razy wyższy niż danych uzyskanych przy liczbie złożeń 2. Analizując uzyskane dane liczbowe, nie widać jednoznacznego przełożenia się wzrostu liczby złożeń na korzystną zmianę rozrzutu średnich wartości czasu i amplitudy sygnału odbitego na granicach rozpoznanych warstw.

Z punktu widzenia zastosowań pomiarowych oznacza to, że w przypadku pomiarów płytkich warstw konstrukcji nawierzchni drogowych antenami 1000 MHz ekonomicznie niezasadne jest zwiększanie parametrów takich jak częstotliwość próbkowania i liczba złożeń kosztem czasu wykonania pomiarów, ponieważ nie zyskuje się na jakości ilościowej materiału pomiarowego. Zwiększenie kroku pomiarowego do 10 cm nie zmieniło ilościowej jakości materiału pomiarowego, ale jest mniej zasadne, jeśli chodzi o rozpoznanie zaburzeń o charakterze hiperbol.

Wyniki ilościowe uzyskane na tym samym profilu zestawem: jednostka CU II – antena ekranowana cu1000 MHz w konfrontacji z wynikami z jednostki CU II – anteny ekranowane cu500 MHz i pro500 MHz wskazują, że czas rejestracji sygnału odbitego na granicach rozpoznanych warstw posiada przesunięcie na poszczególnych warstwach. Zjawisko to ma charakter systematyczny, a różnice czasu pomiędzy granicami to 0,4 ns. Wartość ta przekłada się na różnicę oszacowania grubości warstw na poziomie 2 cm przy założeniu prędkości fali w ośrodku na poziomie 0,1 m/ns (rys. 20).



Rys. 20. Zapis oscylacji sygnału w czasie dla echogramów uzyskanych jednostką CU II i antenami cu800 MHz, pro800 MHz (po lewej); i jednostką CU II i anteną cu800 MHz oraz jednostką ProEx antena pro800 MHz (po prawej) (źródło: publikacja nr 5).

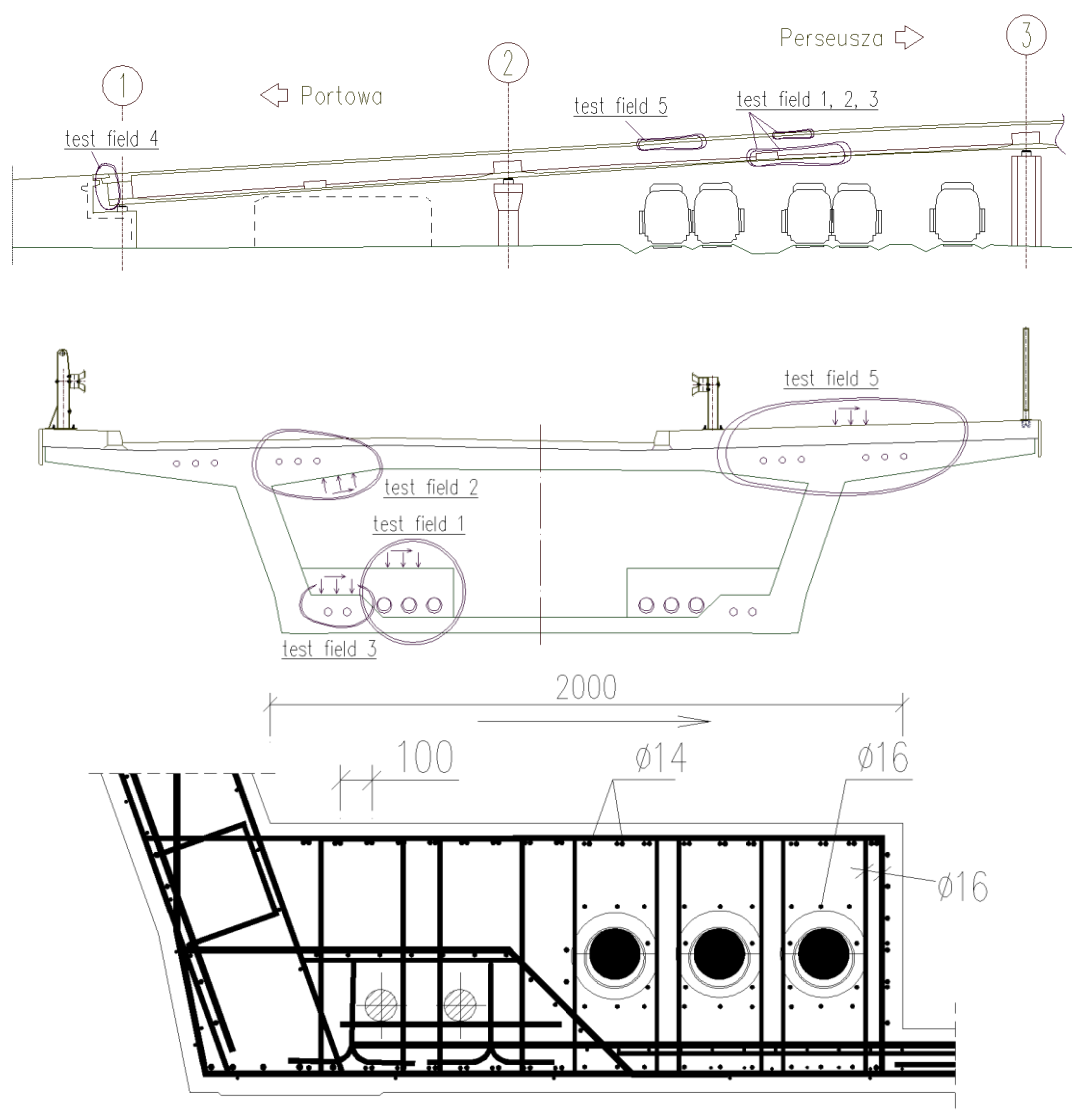
Wyniki ilościowe uzyskane na tym samym profilu zestawem: jednostka CU II - antena ekranowana cu1000 MHz w konfrontacji z wynikami z jednostki CU II – anteny ekranowane cu800 MHz i pro800 MHz wykazują wzajemną zgodność co do czasu rejestracji sygnału odbitego na granicach rozpoznanych warstw. Od tych wyników odbiega materiał pomiarowy pozyskany zestawem ProEx i anteną pro 800 MHz. Czas rejestracji sygnału odbitego na granicach rozpoznanych warstw posiada przesunięcie. Zjawisko to ma charakter systematyczny, a wyniki różnice czasu pomiędzy granicami to 0,2 ns. Wartość ta przekłada się na różnicę oszacowania grubości warstw na poziomie 1 cm przy założeniu prędkości fali w ośrodku na poziomie 0,1 m/ns.

Występujące wartości przesunięć czasu rejestracji sygnału odbitego na poszczególnych warstwach oznaczają, że materiał pomiarowy pozyskany zestawami różnych konfiguracji służący ocenie porównawczej grubości warstw powinien być każdorazowo kalibrowany np. w relacji do odwiertów. Przyjmowanie raz wyznaczonej wartości prędkości może generować dodatkowe błędy określenia grubości. Wniosek ten jest szczególnie istotny, gdy ze względu na przyspieszenie prac, echogramy realizowane będą w tym samym obszarze różnymi zestawami pomiarowymi, nawet tego samego producenta i przy zgodnych parametrach anten.

W echogramach pozyskanych antenami z zestawu ProEx (500 MHz, 800 MHz) zarejestrowane granice warstw charakteryzuje niższa wartość amplitudy o około 400 - 600 jednostek w porównaniu z antenami z zestawu CU II. Wniosek ten jest istotny, jeśli wynik mocy odbitego sygnału będzie również analizowany w pomiarach o charakterze porównawczym, a dane były rejestrowane różnymi zestawami pomiarowymi.

Zastosowanie pomiarów georadarowych w paśmie wyższych częstotliwości obejmuje również zagadnienia inwentaryzacji stanu drogowych obiektów inżynierskich, wśród których dominują obiekty mostowe. Jednym z typów konstrukcji są mosty sprężone. Sprężanie realizowane jest za pomocą cięgien: strun lub kabli. W przypadku stosowania kabli czynnikiem istotnym dla powstawania niekorzystnych strat sił sprężających jest tarcie powstające w kanałach o zaburzonej geometrii. W celu poprawnej oceny nośności takich obiektów pojawia się potrzeba poprawnej identyfikacji cięgien oraz zbrojenia. Mogą do tego posłużyć metody nieniszczące, np. metoda georadarowa. Zagadnienie to poruszono w **publikacji nr 6** pod tytułem **„GPR identification of prestressing tendons in areas with high density of ordinary reinforcement”**. Głównym celem tej pracy jest weryfikacja możliwości rozpoznania cięgien sprężających i zbrojenia w różnych obszarach testowych dźwigara skrzynkowego. Badany obiekt jest sprężonym mostem drogowym wykonanym w technologii nasuwania podłużnego. Ustrój nośny stanowi jednokomorowa pięcioprzęsłowa skrzynka sprężona o schemacie statycznym belki ciągłej. W konstrukcji zastosowano dwa rodzaje cięgien sprężających – prostoliniowe i docelowe zewnętrzne. Obiekt (zgodnie z technologią) sprężono cięgnami prostoliniowymi w płycie górnej i dolnej oraz cięgnami zewnętrznymi, docelowymi, których trasa jest w przybliżeniu łamaną przecinającą układ dewiatorów i poprzecznic. Oba są przedmiotem poszukiwań w różnych obszarach testowych. Obszary testowe obejmują wybrany fragment płyty dolnej i górnej, dewiator sprężenia zewnętrznego oraz strefę zakotwień cięgien. We wszystkich obszarach testowych posłużono się anteną wysokiej częstotliwości (1000 MHz), przeznaczoną do badania struktur obiektów inżynierskich (rys. 21).



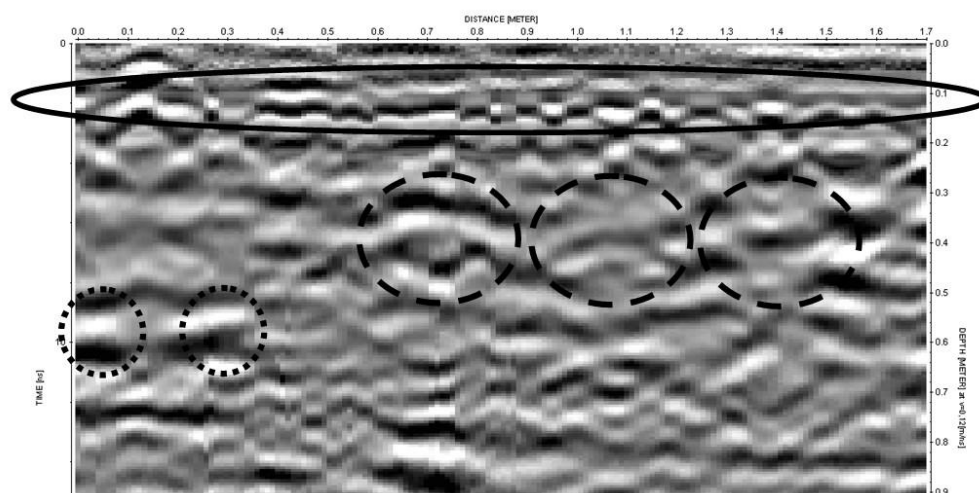


Rys. 21. Obiekt i obszary badań wyróżnione na przekroju podłużnym i poprzecznym skrzynki z fragmentem projektowanego przebiegu zbrojenia miękkiego i cięgien (źródło: publikacja nr 6)

Wybór był podyktowany wymiarami poszukiwanych obiektów, w szczególności poszyciem kabli sprężających o wymiarach od 8 do 16 cm. Ze względu na charakterystykę sygnału zastosowana antena umożliwia profilowanie z rozdzielczością pionową 2,5-3,5 cm przy prędkości fali 10-14 cm/ns. Zakres głębokościowy sygnału to około 1 m. Dane pozyskiwano z krokiem 1 cm przy częstotliwości próbkowania 11 GHz i 32 złożeniach. Profilowania poddano następującym procedurom filtracji: 1D, tj. usunięciu składowej stałej sygnału GPR, usunięciu szumu o niskiej częstotliwości przez odjęcie średniej próbki w danym oknie czasowym pojedynczego śladu, wzmocnienie sygnału na podstawie średniej krzywej rozkładu amplitudy 2D usuwającej średnią śladu, filtrację pasmowo-przepustową i migrację Stolt-fk. Ostatnia procedura filtracyjna ma pomóc szacować prędkość fali w ośrodku, co stosowano przy skalowaniu głębokościowym echogramów.

Jako pierwszy obszar testowy obrano dewiator sprężenia zewnętrznego. Jest to bardzo ważny element konstrukcyjny i co za tym idzie, silnie wzmocniony zbrojeniem miękkim. Zarówno cięgna sprężające, jak i zbrojenie miękkie było przedmiotem georadarowych poszukiwań w tym obszarze badawczym. Profile georadarowe wykonano po górnej płycie

dewiatora wg przekroju zaprezentowanego na rysunku 21, realizując kilka profilowań w rozstawie co 30 cm. Przykładowy echogram wykonany w połowie dewiatora zaprezentowano na rysunku 22.



Rys. 22. Echogram środkowej części dewiatora ze wskazaniem strefy zbrojenia górnego i odwzorowań dla osłon kabli sprężających (źródło: publikacja nr 6)

Drugim obszarem badań była część płyty górnej dźwigara skrzynkowego obserwowanego z wnętrza skrzynki, zaś w obszarze piątym profilowano ten element konstrukcji od strony górnej, czyli po powierzchni kapy chodnikowej. Obszar trzeci obejmował obserwację pogrubienia płyty dolnej (blisko połączenia ze środkiem) w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanego wcześniej dewiatora. Publikacja prezentuje wnikliwą interpretację treści echogramów, na podstawie których wypracowano wnioski końcowe.

Osiągnięto udaną kontrolę górnego zbrojenia (bliżej anteny) we wszystkich obszarach testowych, potwierdzając w ten sposób skuteczność metody w tym zastosowaniu.

Zachowanie sygnału w pobliżu ścięgien mimośrodowych i centrycznych różni się od tła, ale ze względu na dużą gęstość zwykłego zbrojenia nie można było wywnioskować ich dokładnego położenia. Lokalny, mniejszy stopień wystąpienia zbrojenia spowodował ich lepszą reprezentację na echogramach.

Na płycie dolnej ujawniono ograniczenia geometryczne metody (zbyt duży wymiar poszukiwanego elementu w stosunku do wymiaru profilu). W badaniach płyty chodnika i górnej płyty nośnej przebiegu ciągien nie stwierdzono. Zlokalizowano tylko zbrojenie, ale także obecność osłon kabli elektrycznych. Należy zauważyć, że ich średnica odpowiada średnicy ciągien sprężających stosowanych w budowie mostów. Potwierdza to potencjał sprzętu GPR do wykrywania takich nieciągłości pod zbrojeniem. Warunkiem jest jednak mniejsza gęstość zbrojenia, mniejsze średnice prętów zbrojeniowych i bliskość ścięgien do powierzchni anteny.

Przyszłe badania silnie wzmocnionych obszarów będą wymagały większej gęstości profili, zastosowania anten wysokiej częstotliwości, a nawet zastosowania środków inwazyjnych. Zastosowanie anten o wyższej częstotliwości wydaje się uzasadnione ze względu na wyższą rozdzielczość pionową echogramów. Istnieje jednak obawa, że rozdzielczość tych anten będzie niekorzystna, ponieważ zapisany materiał ujawnia odbicia od frakcji kruszywa, co nie pozwala na wyraźne rozróżnienie innych elementów.

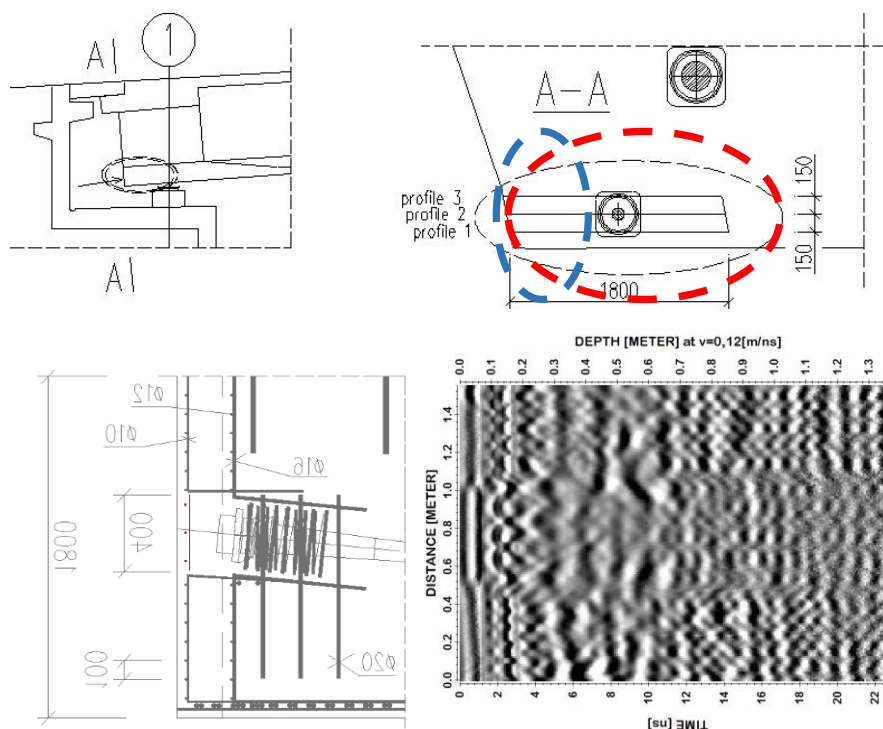
W publikacji nr 7 pod tytułem „*Identification of prestressing tendons using ground penetrating radar in particular the anchorage zone*” przedstawiono badania georadarowe

obejmujące obszar czwarty obiektu przedstawionego na rysunku 21, które dopełniają wcześniejsze rozważania. W pracy skupiono się na możliwości detekcji zbrojenia zabezpieczającego i głowic cięgien w wybranej części strefy zakotwień, jak również potencjalnych pustek czy niedowibrowań tej strefy, co daje szansę jeszcze na reakcję techniczną w przypadku wątpliwości co do poprawnego wykonania (rys. 23). Wyniki inspekcji odniesiono do założeń projektu wykonawczego.



Rys. 23. Przykład uszkodzeń strefy zakotwień przed i po programie naprawczym (źródło: publikacja nr 7)

Analizowany obszar testowy obejmował strefę zakotwienia wybranego cięgna prostoliniowego płyty dolnej przy podporze. Zgodnie z projektem wykonawczym w obszarze tym znajduje się jedna głowica cięgna prostoliniowego o średnicy 270 mm, wraz ze zbrojeniem zabezpieczającym w postaci spiral i ramek o średnicy ok. 350 mm. Oprócz tego, powierzchnię czołową strefy zazbrojono siatką prętów średnicy 10 mm. Istnieje również dość złożony układ zbrojenia wgłębnego składającego się z głównie z ramek o średnicach od 12 mm do 25 mm. Relację projektu i wyniki badania georadarem przedstawiono na rysunku 24.

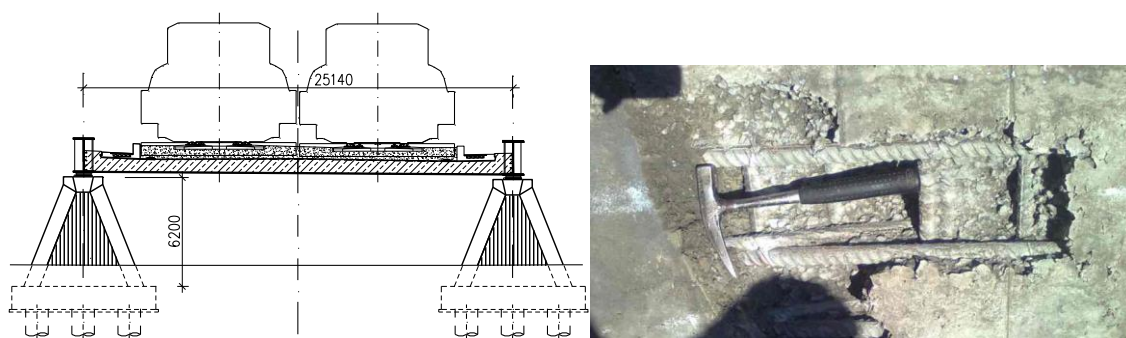


Rys. 24. Lokalizacja i układ echogramów w relacji do zakotwienia oraz zestawienie przekroju projektowanego zbrojenia w strefie kotwienia w konfrontacji z wynikiem badań GPR (źródło: publikacja nr 7)

Mimo że strefa zakotwień to obszar istnienia silnie zagęszczonego, przestrzennego

zbrojenia, to rezultaty detekcji są obiecujące. Wynik profilowań okazał się zbliżony na wszystkich trzech echogramach. Zidentyfikowano siatki przyczółowe, dodatkowe zbrojenie wkręcane przykrywające bloki oporowe oraz położenie głowicy. Analiza echogramów nie dała całkowitej pewności co do braku pustek i niedowibrowań. Jednak ciągłość i jednolitość sygnału w rejonie głowicy wskazuje z dużym prawdopodobieństwem na brak defektów związanych z występowaniem niedowibrowań. Zdolność rozdzielcza metody okazała się zbyt niska do poprawnego odróżnienia bloku oporowego cięgna od spirali zwojących. W przyszłości, by bardziej uszczegółowić rezultaty, należałoby podjąć próby z zastosowaniem anten wyższych częstotliwości i inspekcji zakotwienia również od spodu. W przedmiotowym obiekcie było to trudne ze względu na istnienie załamania dolnej płaszczyzny dźwigara tworzących bieżnie do nasuwania.

Wspomniane w powyższej publikacji defekty ciągłości konstrukcji (pustki) wynikłe z niedowibrowań i ich detekcja metodą GPR są przedmiotem dociekań w kolejnej **publikacji nr 8** pod tytułem **„Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar method”**. W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących, które zrealizowano na żelbetowej podporze eksploatowanego obecnie wiaduktu kolejowego o nietypowym, trapezowym kształcie z gęsto rozmieszczonym zbrojeniem. W procesie wykonawczym po rozszalowaniu na zewnętrznej powierzchni uwidoczniły się wady w postaci raków, które sugerowały możliwość wystąpienia również pustek podpowierzchniowych (rys.25).



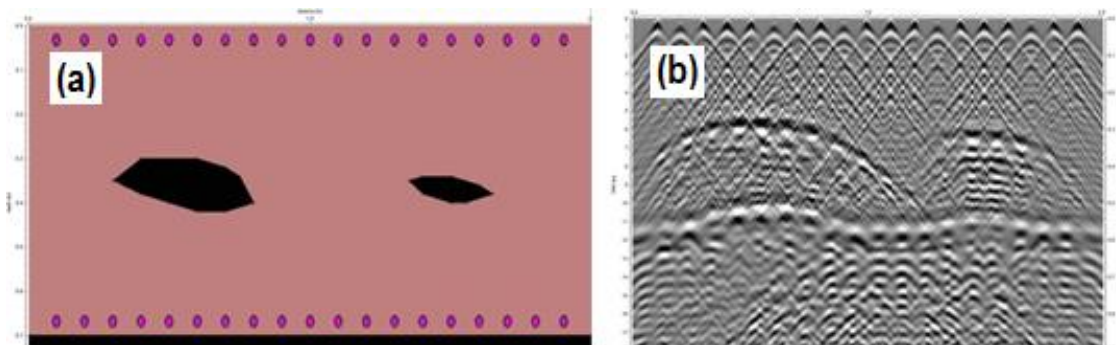
Rys. 25. Przekrój przez wiadukt kolejowy podany badaniom oraz zdjęcie wad wykonawczych na jednej z podpór mostowych (źródło: publikacja nr 8)

Aby stwierdzić, czy rzeczywiście takie pustki powstały i określić ich przybliżoną lokalizację zastosowano badania metodą GPR. Wiedza na temat rozkładu pustek jest istotna dla weryfikacji wpływu ich występowania na nośność podpory, co wymaga dodatkowych obliczeń dla takiej wadliwej konstrukcji i wdrożenia procesów naprawczych.

Skuteczność detekcji pustek wykazano w przypadku zjawisk krasowych. Tym razem obszarem badań były zjawiska w skali makro. Ponieważ założeniem była detekcja pustki o wymiarach zbliżonych do osłon kabli w dewiatorze zachowano podobną co w poprzednich artykułach metodykę badań polowych. Różnicą jest jednak nieregularna geometria pustek, a do tego nie mniej gęste zbrojenie. Pomiary zrealizowano w najbardziej newralgicznych obszarach podpory w formie echogramów (B-skan) oraz zebrano w postaci szkicu w układzie C-skan. Aby uzyskać informację na temat odwzorowywanej pustki w ośrodku z betonu zbrojonego, kolejny raz do metodyki badań i interpretacji wprowadziłem symulację propagacji fali elektromagnetycznej metodą FDTD. W modelowaniu przyjąłem geometrię i parametry ośrodka zbliżone do geometrii podpory będącej przedmiotem badań diagnostycznych. Zarówno echogram będący wynikiem symulacji, jak i echogramy zarejestrowane w terenie,

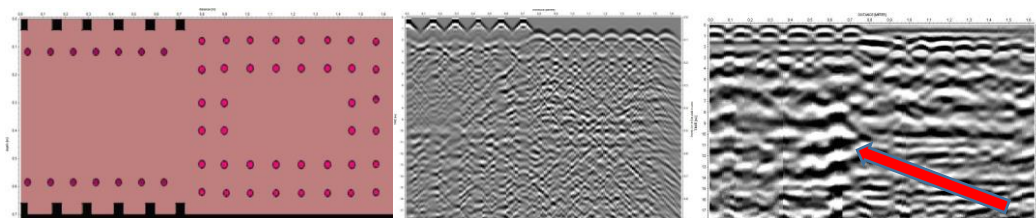
przetworzono tymi samymi procedurami jakie podano we wcześniejszych publikacjach z tego zakresu.

Wykazałem, że w modelowym ośrodku obraz pustek jest jednoznacznie widoczny na echogramie, co potwierdza potencjalną możliwość ich rozpoznania w materiale pozyskanym w terenie (rys. 26).



Rys. 26. Symulacja propagacji fali: a) model ośrodka betonowego, b) wynik filtracji echogramu wynikowego (źródło: publikacja nr 8)

Ze względu na bardziej złożony kształt obrysu przekroju oraz większą ilość zbrojenia w badanej podporze, przygotowałem dodatkową symulację rozkładu pola falowego. Interpretację treści echogramów oparto o porównanie zarejestrowanego zapisu georadarowego z wynikami modelowania pola falowego FDTD przy znanej geometrii badanej podpory (rys. 27).



Rys. 27. a) Model ośrodka zrealizowanego na badanej podporze, b) wynik filtracji echogramu wynikowego symulacji c) wynik filtracji echogramu rzeczywistego (źródło: publikacja nr 8)

W obrazie rzeczywistym pomiędzy 0,5 a 0,7 metrem echogramu na głębokości 30 cm uwidacznia się silna anomalia, która nie ujawnia się w zapisie modelowym. Ze wstępnej analizy materiału pomiarowego takich odpowiedzi sygnału na podporze odnotowano co najmniej kilka. Pełne opracowanie danych oparte o przytoczoną metodykę pozwoliło na stworzenie mapy rozkładu miejsc wykazujących w obrazie radarowym znamiona pustek. Na jej podstawie w celu oceny wpływu zidentyfikowanych pustek na nośność konstrukcji utworzono powłokowy model MES podpory. Pokazano w nim różnice w rozkładzie naprężeń w podporze z ciągłą strukturą wewnętrzną i podporze z zamodelowanymi pustkami (rys. 28).

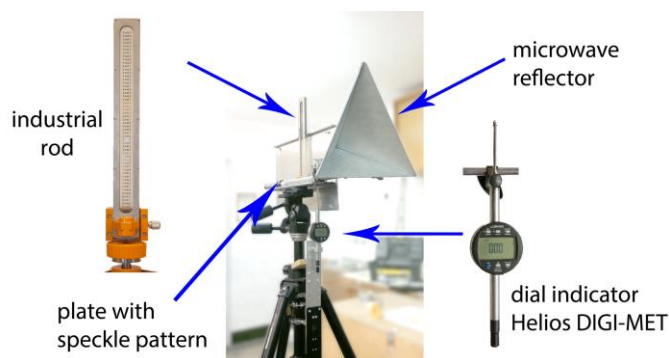


Rys. 28. Wpływ pustek na zmiany jakościowe w mapach naprężeń pionowych (źródło: publikacja nr 8)

Uzyskane wyniki zostały wykorzystane przez pracowników Katedry Mechaniki Mostów Politechniki Śląskiej przy sprawdzeniu nośności podpory oraz przy tworzeniu skutecznego programu naprawczego, gdzie w oparciu o zrealizowane prace badawcze dokonano celowanych wierceń i iniekcji cementowych.

D. Zasady i dokładnościowe aspekty prowadzenia pomiarów metodą naziemnej interferometrii radarowej.

Naturalnym procesem badawczym jest szczegółowa weryfikacja nowych metod pomiarowych realizowana w warunkach terenowych. Dodatkowe czynniki zewnętrzne obciążające proces pomiarowy dają podstawę oceny rzeczywistych możliwości technologii. Zagadnienie to jest przedmiotem **publikacji nr 9** pod tytułem ***Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements***. Celem pracy była walidacja dwóch bezkontaktowych metod pomiarowych dedykowanych wyznaczaniu przemieszczeń pionowych obiektów mostowych, co jest kluczowe w przypadku ich trudnodostępnych fragmentów (przęsła mostów i wiaduktów nad obiektami o obciążeniu ruchem czynnym). Przedstawione w publikacji badania dotyczą metody naziemnej interferometrii radarowej reprezentowanej przez jednostkę IBIS-S oraz systemu wizyjnego przygotowanego przez zespół z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. System wizyjny oparty o rejestrację obrazów widzialnych z algorytmem opartym na korelacji obrazów przeznaczony jest do wyznaczania przemieszczeń konstrukcji inżynierskich. Plan eksperymentu obejmował terenowe badania symulacyjne i docelowe na eksploatowanym stalowym wiadukcie kolejowym. Badania symulacyjne zrealizowano z zastosowaniem odpowiednio skonstruowanego przez autora stanowiska pomiarowego umożliwiającego realizację dowolnego przemieszczenia w kierunku pionowym (rys. 29). Pionowy ruch głowicy statywu był kontrolowany za pomocą elektronicznego czujnika zegarowego Helios DIGI-MET, który zapewnia zakres pomiarowy 50 mm i odchylenie standardowe 0,01 mm (i maksymalny dopuszczalny błąd 0,02 mm).



Rys. 29. Stanowisko pomiarowe do zadawania kontrolowanych przemieszczeń pionowych reflektora mikrofalowego (źródło: publikacja nr 9)

Konieczna była weryfikacja poprawności działania stanowiska pomiarowego, co zrealizowano w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem niwelacji precyzyjnej analogowym niwelatorem optycznym Carl Zeiss Jena NI002. Jego odchylenie standardowe wynosi $\pm 0,2$ mm na 1 km podwójnej niwelacji. Daje to błąd $\pm 0,09$ mm dla wykonanych pomiarów przemieszczeń.

W wyniku weryfikacji obserwacji metodą par spostrzeżeń otrzymano wysoką zgodność przemieszczeń równą 0,025 mm przy współczynniku korelacji Pearsona równym 0,9999.

Po tym eksperymencie przygotowano test symulacyjny, aby w przybliżonej dla obiektów mostowych geometrii (pomiar na wale przeciwpowodziowym) przeprowadzić już weryfikację wskazań jednostki radarowej i systemu wizyjnego. Schemat ideowy przedstawiono na rysunku 30. Kontrolowany ruch pionowy na stanowisku pomiarowym obserwowano dwoma systemami referencyjnymi: czujnikiem zegarowym, niwelacją podobnie jak w badaniach laboratoryjnych oraz walidowanymi systemami bezkontaktowymi. W wyniku testów otrzymano następujące zgodności: system referencyjny - radar IBIS: 0,378 mm, system referencyjny - system wizyjny: 0,506 mm, systemy testowane wzajemnie 0,561 mm.

Na docelowym obiekcie testowym wykonano obserwacje wielu ugięć przęsła wiaduktu jako odpowiedzi na wymuszenie pochodzące od przejeżdżających składów tramwajowych.

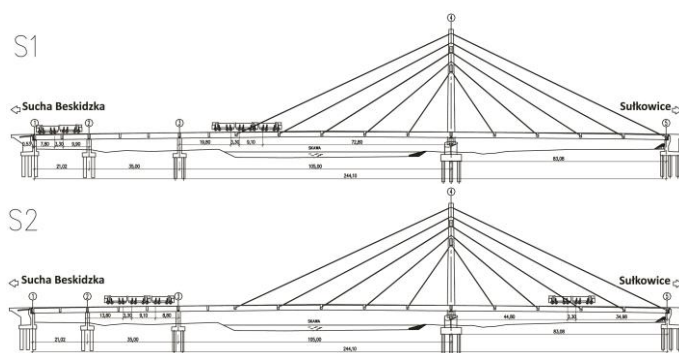


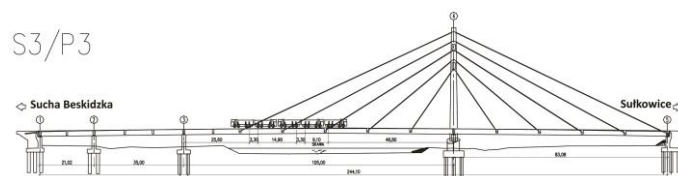
Rys. 30. Szkic relacji geometrycznych urządzeń w symulacyjnym (górny) i docelowym (dolny) teście terenowym (źródło: publikacja nr 9)

Obserwacje metodą wizyjną wymagały korekt geometrycznych w oparciu o macierz obrotów i skalowanie na podstawie wyznaczenia stałej kamery dla zastosowanego aparatu, co zapewniło korektę geometryczną obrazów i ich odpowiednie przeskalowania. Zgodność wskazań ugięć wyznaczonych obiema metodami oparta została o analizę 8 przejazdów dla 10-

14 punktów pomiarowych na obiekcie. Analiza statystyczna oparta o testy zgodności dla wyników wykazała zgodność systemów pomiarowych w eksperymencie docelowym na poziomie 0,601 mm dla maksymalnego ugięcia. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów zweryfikowano dokładności metod. Wykazano, że ze względu na ograniczone kierunki obserwacji obie metody mogą się wzajemnie uzupełniać. Nie bez znaczenia jest fakt, który wskazano w publikacji, iż jednostka IBIS-S jest podatna na zaburzenia „clutter”, co ujawniło się w wynikach i zostało przedstawione w publikacji. Efekt ten nie występuje w danych z systemu wizyjnego, jednak ten wymaga innego kierunku obserwacji niż oferuje radar, co przemawia na korzyść radaru w nieprzychylnych dla systemu wizyjnego warunkach obserwacji. Te i inne przeprowadzone działania testowe realizowano w ramach projektu MNiSW N N526158838 „Opracowanie zasad wyznaczania drgań i przemieszczeń budowli inżynierskich z wykorzystaniem interferometrii radarowej”, którego byłem wykonawcą, a ujęto kompleksowo w pozycji **„Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry”**.

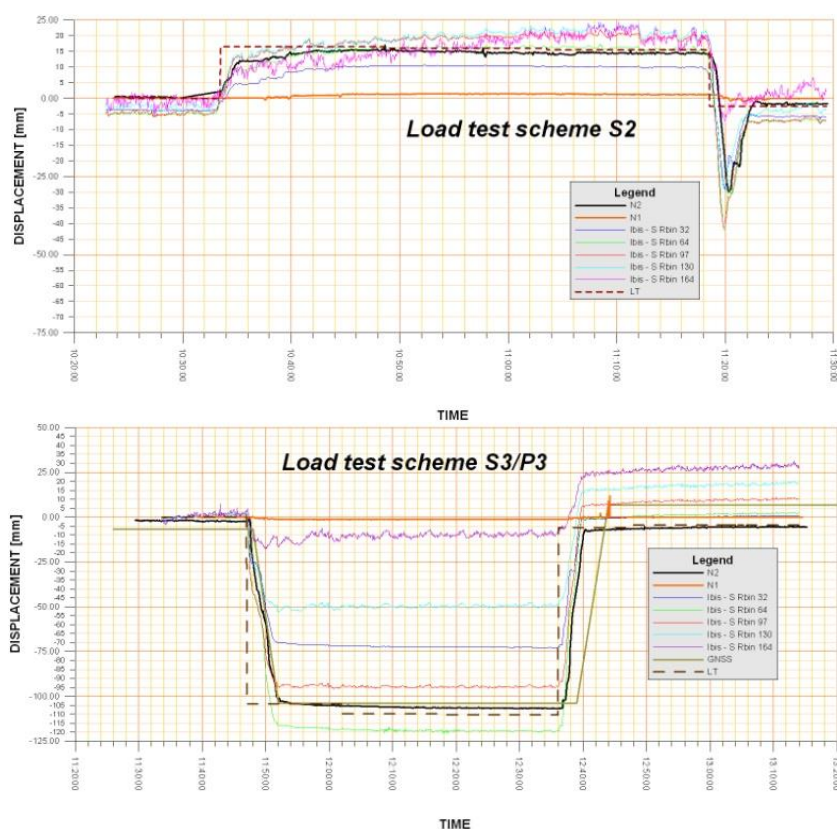
Wykonane z moim udziałem testy walidacyjne pozwoliły na realizację prac o charakterze wdrożeniowym na różnych obiektach inżynierskich. Ważną publikacją ujmującą weryfikację przydatności technologii GB-SAR w praktyce mostowej jest pozycja pod tytułem **„Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry – case study”**. Przedstawiono w niej badania weryfikacyjne, gdzie metoda interferometrii radarowej została zastosowana kompleksowo w procesie próbnego obciążenia mostu realizowanego w oparciu o polskie normy i zarządzenie GDDKiA. Obiekt pomiaru to jednopylonowy most wantowy o sprężonej belkowo-płytowej konstrukcji pomostu. Całość konstrukcji ma długość 244 m, obejmuje 4 przęsła, gdzie tzw. przęsło nurtowe posiada długość 105 m. Na obiekcie tym akredytowane laboratorium drogowe dokonało wyznaczenia reakcji konstrukcji na obciążenia z zastosowaniem analogowej niwelacji precyzyjnej, czujników zegarowych lub indukcyjnych dla podpór i przęseł w obciążeniach statycznych oraz czujników indukcyjnych i akcelerometrów dla przęseł w obciążeniach dynamicznych. Oczywiście ten typ obserwacji wymaga dostępu i montażu części systemów pomiarowych na konstrukcji. W całym procesie realizacji próbnego obciążenia przeprowadzono również obserwacje z zastosowaniem naziemnej jednostki interferometrycznej IBIS-S. Jednostka nie wymaga bezpośredniego dostępu do obiektu a obserwacje prowadzone są zdalnie, w czym ujawnia się przewaga techniczna technologii GB-SAR. Obserwacje geodezyjne na obiekcie prowadzono ponadto z zastosowaniem odbiornika GNSS pracującego w trybie RTK z częstotliwością 10 Hz oraz niwelatora cyfrowego z zewnętrznym oprogramowaniem wyzwalającym i rejestrującym obserwacje do łaty z częstotliwością 0,25 Hz. Badania zaprojektowano tak, aby metody alternatywne realizowały obserwacje przęsła nurtowego. Badania zrealizowano dla 3 z 7 schematów statycznych (rys. 31)





Rys. 31. Schematy obciążeń statycznych (źródło: publikacja nr 10)

Otrzymane łączne wyniki obserwacji wykonanych przez poszczególne jednostki pomiarowe w zakresie wyznaczenia wartości ugięcia zaprezentowano na dwóch wykresach dla schematów S2 i S3/P3 (rys. 32).



Rys. 32. Wyniki przeprowadzonych badań statycznych (źródło: publikacja nr 10)

Dla zbliżonych punktów obserwacji (w warunkach terenowych nie była technicznie możliwa pełna zgodność punktów obserwacji) zbieżność wyników oscyluje w granicach pojedynczych milimetrów. Na wykresie można zaobserwować to co jest zaletą stosowania pomiarów radarowych, czyli wielość punktów obserwacji. Ujawnia się też wzrost szumu pomiarowego ze wzrostem odległości obserwacji. Wyniki tego testu wskazały na niezwykle ważny problem wpływu korekt geometrycznych i atmosferycznych, gdyż jak widać obserwacje z radaru nie w pełni wróciły do pozycji wskazanej przez niwelator i czujnik zegarowy. Efekt ten był inspiracją do badań i został omówiony w kolejnych publikacjach. Uwagę zwraca również zadawalający wynik pomiarów niwelacji i GNSS.

Skuteczność jednostki IBIS-S w warunkach polowych zweryfikowano również w przypadku badań zjawisk dynamicznych. Dla poddanej obserwacjom konstrukcji przeprowadzono analizę modalną (MA) wyznaczając szereg postaci drgań, którą zestawiono z

wynikami z czujników indukcyjnych (LT) i z radaru (tab. 2).

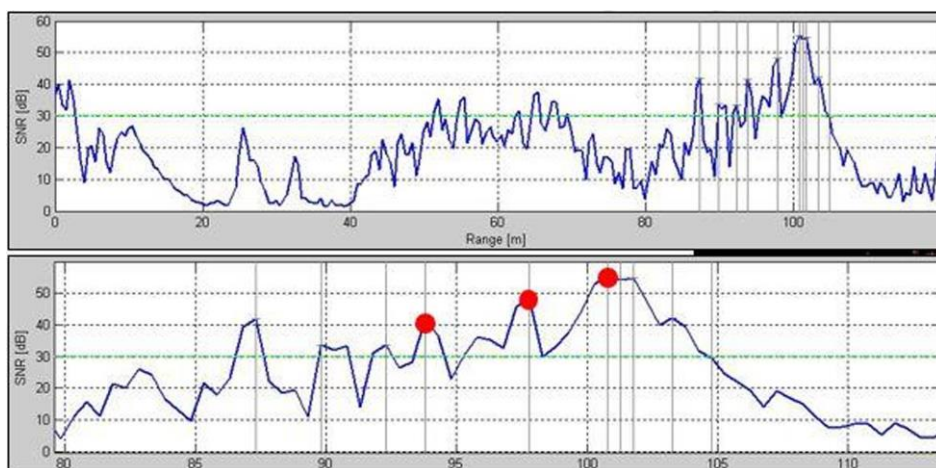
Tab. 2. Porównanie częstotliwości drgań własnych obiektu poddanego obserwacji (źródło: publikacja nr 10)

No. of vibration mode	MA Hz	IBIS Hz	LT Hz
1	0.58	0.74	0.72
2	0.93	-	1.14
3	1.09	1.10	1.24
4	1.43	-	1.31
5	1.54	1.60	1.59
6	1.73	1.66	1.70
7	-	1.82	-
8	1.92	-	1.87
9	1.96	1.96	2.07
10	2.45	-	2.45
11	2.53	-	2.63
12	2.58	-	2.69
13	3.11	2.92	3.06
14	3.41	3.42	3.46
15	3.58	-	3.82

Na tej podstawie, wraz z przedstawicielami mostowych jednostek badawczych, stwierdzono zgodność wyników w określonym przedziale dokładności pomiędzy jednostką radarową oraz innymi sprawdzonymi technologiami pomiarowymi. Zaowocowało to współpracą z akredytowanymi laboratoriami drogowymi w zakresie obserwacji prowadzonych na potrzeby badań odbiorczych, jakimi są próbne obciążenia dla trudno dostępnych przęseł nurtowych bądź przęseł wiaduktów nad czynną linią kolejową lub drogową (most przez Wisłę w Kwidzynie, Grudziądzu, przez Brdę Bydgoszcz, wiadukt KST Kraków, Katowice węzeł Murckowska).

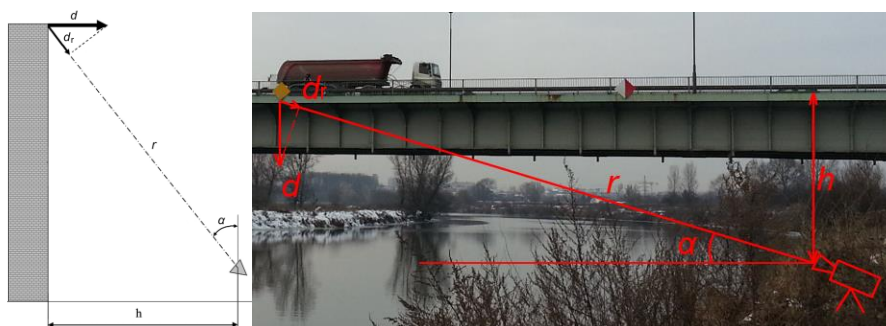
Prowadzone prace badawcze jednoznacznie wskazywały na problematykę identyfikacji punktów, które w metodzie naziemnej interferometrii są generatorem sygnałów zwrotnych rejestrowanych przez jednostkę pomiarową. Problematyka wraz z rozwiązaniem została przedstawiona w monografii pod tytułem: „**Wybrane problemy geodezji inżynierskiej**” w rozdziale „**Identyfikacja elementów sceny radarowej na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego**”. Efektem liczbowym pomiarów jednowymiarową jednostką GB-SAR jest profil radarowy będący dwuwymiarowym wykresem mocy S/N w relacji do odległości przestrzennej, z której ten sygnał powrócił, skwantowany w zależności od zdolności rozdzielczej aparatury. W przypadku jednostki IBIS-S rozdzielczość jest równa lub większa (co do wartości) od 0,5 m (rys. 33).





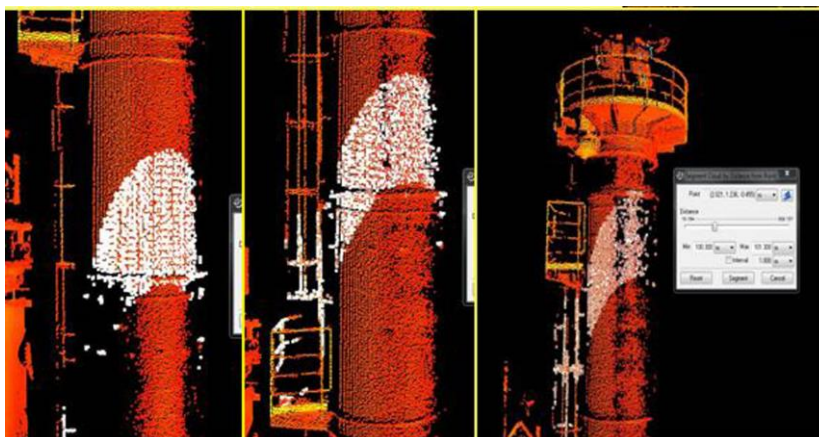
Rys. 33. Widok przykładowej sceny pomiarowej dla radaru interferometrycznego i skanera (górze, po lewej), trzon komina z zaznaczonymi punktami obserwowanymi przez radar (górze, po prawej), profil radarowy całej sceny widzianej przez radar interferometryczny (środek), fragment profilu radarowego obrazującego trzon komina (dół) (źródło: publikacja nr 11)

Wiedza na temat zależności geometrycznych jest niezwykle istotnym czynnikiem w przypadku, kiedy obserwacje jednostką radarową prowadzone są na kierunku innym niż równoległy do maksymalnego przemieszczenia. Wyznaczona wartość przemieszczenia uzyskana przez radar na kierunku obserwacji jest składową całkowitego przemieszczenia. Aby wyznaczyć wartość docelową, konieczne jest uwzględnienie relacji geometrycznej między obserwowanym punktem a pozycją radaru (rys. 34). Informacje o wpływie i znaczeniu tej zależności podają (Kuras i Ortyl, 2014).



Rys. 34. Schemat redukcji geometrycznej jednowymiarowego pomiaru radarowego. (źródło: publikacja nr 11)

Zaproponowana w publikacji oryginalna metodyka prac badawczych zakłada prowadzenie pomiarów radarowych, a po jej zakończeniu pomiar sytuacji terenowej techniką TLS w takim fragmencie, aby w scenie ujęto obiekt i jednostkę pomiarową radaru. Zastosowanie takiego podejścia niezwykle ułatwia prace interpretacyjne w zakresie identyfikacji punktów na obiekcie. W tym celu należy wykorzystać możliwości przetwarzania danych TLS, tak aby osadzić punkt odniesienia pomiarów na skanach w pozycji zeskanowanego radaru i przeszukiwać obszary danych TLS reprezentujące obiekt w przedziałach odległości będących krotnością rozdzielczości (rys. 35). Zasadność tego podejścia proponowanego w 2015 roku potwierdza fakt, że aktualnie produkowane jednostki radarowe będące następstwem dla radaru IBIS mają zaimplementowane proste urządzenia skanujące.



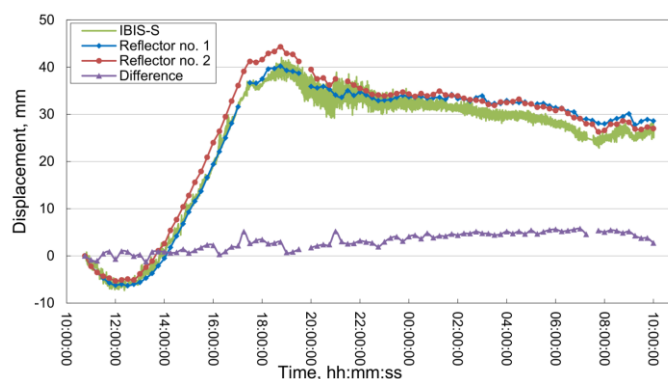
Rys. 35. Segmentacja trójwymiarowej chmury punktów ze względu na rozdzielczość terenową pracy radaru interferometrycznego – identyfikacja poszczególnych zakresów rozdzielczości; przykład dla komina (źródło: publikacja nr 11)

E. **Naziemna interferometria radarowa w pomiarach odpowiedzi konstrukcji wysmukłych na obciążenia statyczne i dynamiczne.**

Odniesienie do sformułowanego zagadnienia znajduje się w **publikacji nr 12** pod tytułem *„Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry”*, w rozdziale *„Surveying of static displacement and vibration of high structures”*. Pozycja jest zbiorem doświadczeń zdobytych na podstawie realizacji kilku eksperymentów, w którym zaprezentowano rozważania nad skutecznością metody w obserwacjach betonowych kominów przemysłowych, masztów telekomunikacyjnych, wież telekomunikacyjnych i wież szybowych. Ze względu na charakter oddziaływań jakim podlegają budowle wysmukłe, badania przeprowadzono w dwóch przypadkach, tj. dla obciążeń statycznych (insolacja, oblodzenie) oraz dynamicznych (wiatr, eksploatacja).

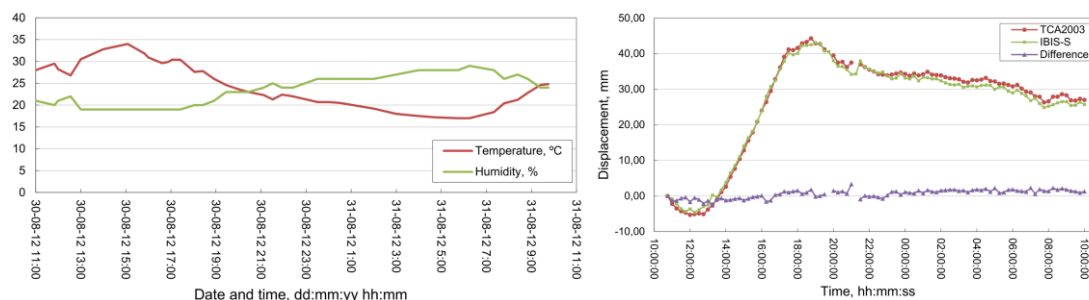
W celu weryfikacji przydatności systemu IBIS-S dla potrzeb monitorowania przemieszczeń statycznych, wykonano 24-godzinny pomiar zmian wychyleń 200-metrowego cylindrycznego dwuprzewodowego komina przemysłowego o średnicy 17 metrów. Pomiar referencyjne prowadzono z wykorzystaniem precyzyjnego tachimetru elektronicznego TCA2003 firmy Leica do dwóch przyrządów, które zostały przymocowane na szczycie komina. Obserwacje radarem prowadzono w interwałach 3 sekundowych, a tachymetrem z punktów o wymuszonym centrowaniu w interwałach 30 minut. Wyraźny radarowy sygnał zwrotny zarejestrowano na trzech poziomach trzonu. Ze względu na potrzebę korelacji z obserwacjami referencyjnymi, najistotniejszy był wynik radarowy ze szczytu komina. Rezultaty porównania wartości przemieszczeń pozyskanych z obu technologii pomiarowych zestawiono na rysunku 36.

Duża zgodność wyników ma miejsce do godziny 17 (średnia różnica poniżej 1 mm), po czym rozbieżność wyników narasta nawet do 6 mm. Z tego powodu dane poddano dalszym korektom w oparciu o znane przemieszczenia pozorne na punkcie stałym (publikacja 12, rozdział 6).



Rys. 36. Wykres przemieszczeń zredukowanych na poziom z systemu IBIS-S oraz z tachimetru TCA2003 wraz z różnicami dla szczytu komina (źródło: publikacja nr 12)

Wskazano na silną korelację pozornych przemieszczeń ze zmianami wilgotności, a podstawowa statystyka opisowa wykazała ostateczną zgodność obserwacji radarem interferometrycznym i tachymetrem precyzyjnym na poziomie 1,3 mm (rys.37).



Rys. 37. Wykres a) danych meteorologicznych w czasie pomiaru b) obserwacji przemieszczeń zredukowanych o wpływ atmosfery (źródło: publikacja nr 12)

System IBIS-S pozwala wyznaczać przemieszczenia jedynie w kierunku radialnym, dlatego ważnym elementem publikacji jest wskazanie, iż w celu wyznaczenia przemieszczeń na płaszczyźnie należy posłużyć się jednocześnie dwiema jednostkami zsynchronizowanymi czasowo. Znając przybliżone położenie interferometrów względem obserwowanego obiektu, sformułowano związek między przemieszczeniem radialnym, a jego składowymi w przyjętym układzie.

Rejestrując w tym samym czasie wartości przemieszczeń punktów trzonu komina przy pomocy dwóch jednostek radarowych, możliwe jest wyznaczenie składowych zmian wychylenia względem poszczególnych osi układu współrzędnych.

Weryfikację skuteczności pomiarów GB-SAR dla obiektów wysmukłych rozszerzyłem o kolejną grupę obiektów jaką są maszty telekomunikacyjne. Kratowa konstrukcja masztu z dodatkowymi odciągami determinowała zupełnie nowe warunki obserwacji dla jednostki radarowej. Ze względu na ograniczony dostęp do konstrukcji i brak możliwości montażu przyrządów obserwację wychyleń masztu na odcinku obserwacji radarem prowadzono metodą kątową. Pomiar zrealizowano w okresie 9-godzinnym, od wschodu do zachodu słońca, z maksymalnym oddziaływaniem nasłonecznienia na konstrukcję.

Analiza materiału pomiarowego pozwoliła na stwierdzenie, iż wyniki pomiarów radarem IBIS-S stanowczo odbiegają od wartości przemieszczeń uzyskanych na podstawie tradycyjnego pomiaru masztu tachymetrem. Różnice występują dla każdego poziomu i każdej godziny. Jako przyczynę niejednorodnego sygnału zwrotnego, odbieranego przez radar,

uznano problem odbicia fali wysyłanej przez instrument od kratowej, niegładkiej konstrukcji budowli. Brak jednolitej ciągłej powierzchni odbicia (zamiast jednego punktu – wiele punktów odbijających), w połączeniu z ruchem budowli powoduje, że system IBIS nie jest w stanie określić poprawnie fazy sygnału powracającego w efekcie tzw. przeskoku fazy, co generuje błędy obliczanych przemieszczeń. Uzyskany wynik wskazuje na zasadność testu, ponieważ w relacji do wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych na kominach i wywołanych insolacją, system IBIS-S w trybie statycznym okazał się nieskuteczny dla konstrukcji stalowej z odciągami.

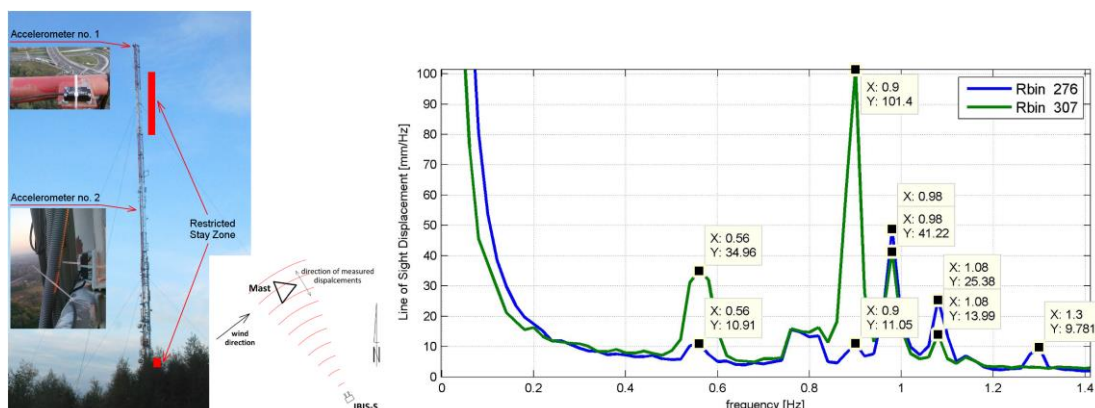
Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że na konstrukcji masztu nie montowano reflektora mikrofalowego, który może wzmocniłby i ukierunkował sygnał zwrotny. Zrealizowano to w przypadku kolejnego obiektu testowego, jakim była drewniana wieża telekomunikacyjna o wysokości 120 m. Efektem było występowanie w profilu radarowym jednoznacznego sygnału zwrotnego. Przeprowadzone obserwacje skonfrontowano z obserwacjami tachymetrycznymi TCA (co 15 min) i GNSS w trybie RTK (co 5 s). Analiza statystyczna pozyskanych wyników obserwacji wskazała zgodność danych z radaru interferometrycznego i TCA na poziomie 1,1 mm, a GNSS RTK – na poziomie 1,8 mm.

Przedstawiony w publikacji wniosek ma dwojakie znaczenie, gdyż prezentuje potencjał nie tylko naziemnej interferometrii radarowej, ale i innych konfrontowanych metod, co wskazuje na ich komplementarność.

Niezwykle istotnym elementem badań diagnostycznych dla obiektów inżynierskich jest analiza odpowiedzi konstrukcji na obciążenia dynamiczne wywołane wiatrem. W omawianej publikacji przedstawiono badania walidacyjne zrealizowane na maszcie telekomunikacyjnym jako jednej z najbardziej wiotkich konstrukcji wysmukłych. W procesie walidacyjnym skonfrontowałem naziemny radar interferometryczny i akcelerometry wykonane w technologii MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems – model FastTracer firmy Sequoia). Tak zrealizowana walidacja był unikatowa w skali kraju ze względu na to, iż dostęp do czynnych masztów telekomunikacyjnych jest mocno ograniczony. Badania zrealizowałem w taki sposób, aby ocenić trzy zagadnienia:

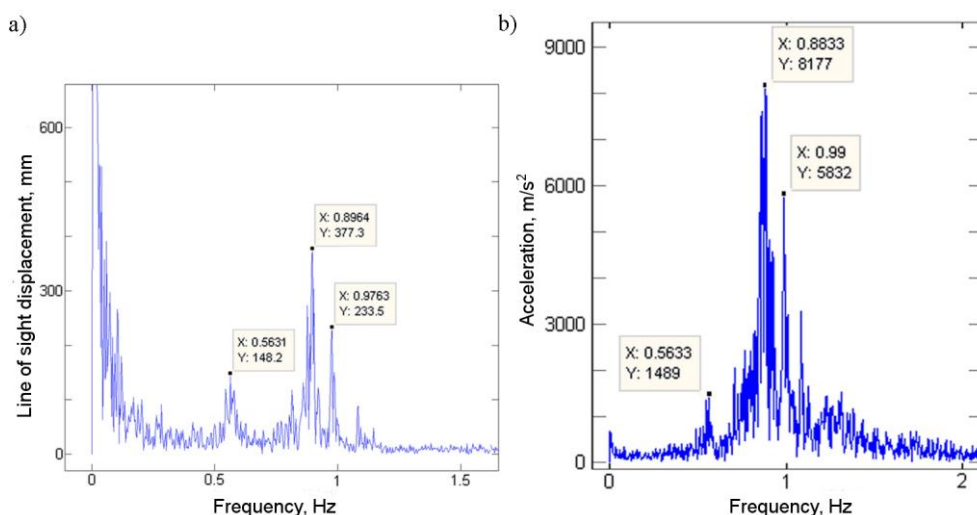
- porównać zachowanie obiektu (jego odpowiedź na wymuszenie dynamiczne) na podstawie pomiaru jednym systemem w różnych miejscach,
- porównać zarejestrowane odpowiedzi konstrukcji rejestrowane dwoma systemami w tym samym miejscu,
- sprawdzić, czy ocena zachowania obiektu dwoma systemami jest jednolita nawet w przypadku różnego rozłożenia punktów pomiarowych.

Akcelerometry rozmieszczono na szczycie i w połowie długości masztu (rys. 38).



Rys. 38. Rozmieszczenie akcelerometrów na obiekcie (po lewej) oraz widmo amplitudowe przemieszczeń punktów obserwowanych radarem (źródło: publikacja nr 12)

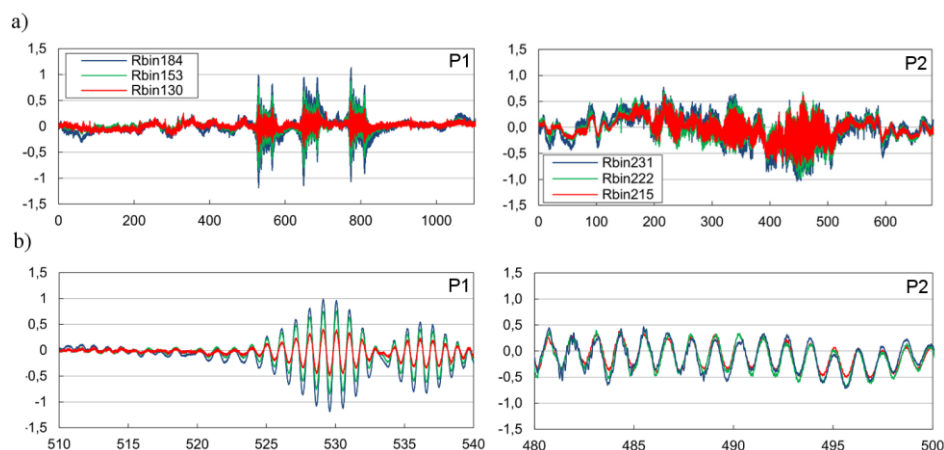
Analiza widmowa danych rejestrowanych akcelerometrami ujawnia częstotliwości dominujące zawarte w sygnale zmian przyspieszenia. Rysunek 39 prezentuje porównanie widma amplitudowego uzyskanego radarem oraz akcelerometrem. Zgodność wyznaczonych częstotliwości dominujących osiąga 0,015 Hz.



Rys. 39. Widmo amplitudowe punktów obserwowanych radarem IBIS-S i akcelerometrem MEMS – punkt na szczycie masztu (źródło: publikacja nr 12)

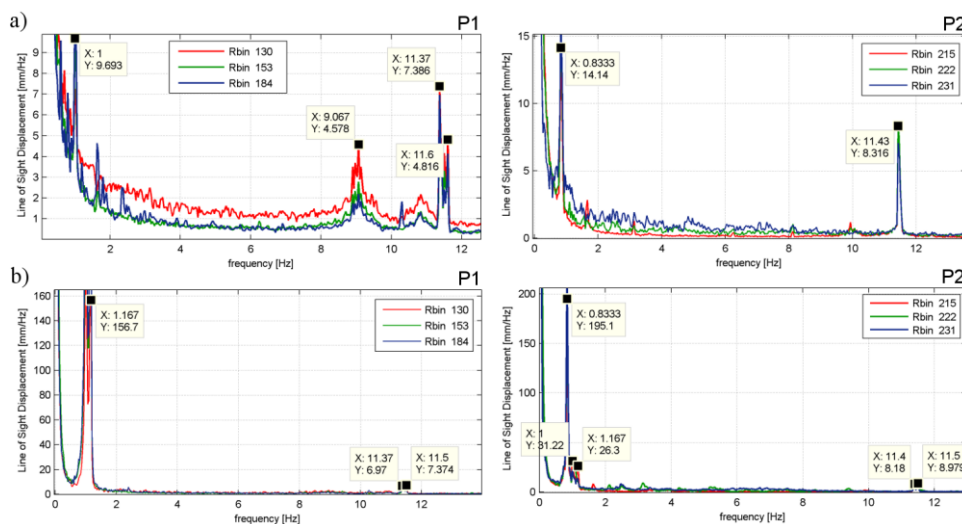
W oparciu o powyższe wyniki wykazałem zgodność dominujących wartości częstotliwości drgań masztu uzyskanych dwiema niezależnymi metodami bazującymi na odmiennych zjawiskach fizycznych. Tym samym w warunkach terenowych potwierdziłem wiarygodność stosowania radaru IBIS-S do badań częstotliwości drgań tego typu obiektów, co miało znaczenie dla innych przeprowadzonych badań wdrożeniowych np. dla kominów i wież wyciągowych. W przywołanym rozdziale zaprezentowano wyniki badań weryfikujących dla eksploatowanych kominów żelbetowych różnej konstrukcji, w których jednostkę IBIS-S wykorzystano do weryfikacji częstotliwości drgań własnych. Różnice względne między wartościami teoretycznymi i rzeczywistymi drgań własnych, wynoszące dla analizowanych przypadków od 6 do 12%, wynikają zwykle z różnic między projektem a jego faktyczną realizacją, a także ze zjawisk reologicznych zachodzących po wielu latach użytkowania.

Ostatnim ciekawym przypadkiem analiz, podanym przeze mnie w rozdziale monografii, są wyniki obserwacji odpowiedzi dynamicznych dla wyciągowej wieży szybowej o konstrukcji basztowej (wysokość obiektu 85 m). W przypadku tego typu obiektu zrealizowany pomiar radarowy posłużył do ustalenia wartości zmian częstotliwości drgań i przemieszczeń wieży poddanej obciążeniu robocznemu. Obciążenie to było wywołane działaniem maszyn wyciągowych. Pomiary zrealizowano z dwóch stanowisk pomiarowych (P1 i P2). Obciążenie wieży podczas obserwacji z obu stanowisk było analogiczne, a wyniki przedstawiono na rysunku 40. Obciążenie wywołało wzrost przemieszczeń na najwyższych analizowanych punktach z 0,5 do 2,3 mm (P1) i 0,8 do 1,8 mm (P2). Przemieszczenia w pozycji P1 wykazują silną regularność i powtarzalność, przeciwnie do przemieszczeń rejestrowanych ze stanowiska P2.



Rys. 40. Przemieszczenia wieży wyciągowej w omawianym przedziale czasu: a) pojedyncze serie obciążeń, b) powiększone fragmenty; oś pionowa – przemieszczenia w mm, oś pozioma – czas w s (źródło: publikacja nr 12)

Ciekawe wnioski płyną z analizy widmowej szeregów czasowych (rys. 41). W okresie braku obciążenia wieży pracą maszyny wyciągowej ujawniają się różne częstotliwości drgań w zależności od kierunku obserwacji. Obciążanie wieży pracą maszyny wyciągowej skutkuje ujawnieniem się dodatkowej częstotliwości (1,17 Hz) dla stanowiska P1 (pozostałe częstotliwości praktycznie nie ulegają zmianie). Zbieżność częstotliwości o nieznacznie różniących się wartościach wywołuje efekt dudnienia podczas pracy maszyny wyciągowej. Zjawisko to jest regularne i powtarzalne. Dla stanowiska P2 podczas pracy maszyny wyciągowej ujawniają się częstotliwości 1,00 Hz i 1,17 Hz, ale są one nieznaczne w porównaniu z częstotliwością dominującą 0,83 Hz.



Rys. 41. Wyniki analizy widmowej: a) przy braku obciążenia maszyną wyciągową, b) przy działającej maszynie wyciągowej (źródło: publikacja nr 12)

Rezultaty uzyskane radarem interferometrycznym mają podobny charakter i wartości do wyników prezentowanych przez Ronghua et al. (2010). Niektóre z częstotliwości, w zależności od postaci modalnej drgań, ujawniają się tylko dla niektórych kierunków, co pokazują różne wyniki analizy widmowej ze stanowisk radaru P1 i P2. Efekt ten należy uwzględnić przy planowaniu pomiarów dynamicznych wież szybowych.

F. Ocena skuteczności pracy masowych tłumików drgań (przeciwdziałanie wpływowi zjawiska wirów Karmana) oraz sposoby wyznaczania logarytmicznego dekrementu tłumienia na bazie klasycznych i radarowych pomiarów geodezyjnych.

Zweryfikowana wysoka skuteczność pomiarów drgań obiektów wysmukłych pozwoliła na zastosowanie pomiarów GB-SAR do dalszych prac aplikacyjno-badawczych, co przedstawiono w publikacji nr 13 pod tytułem *Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer*. Treść artykułu zogniskowana jest na kominach stalowych, które w ostatnich latach są coraz częściej wznoszone w zakładach przemysłowych. Czynnikiem naturalnym wymuszającym drgania kominów, szczególnie stalowych, jest zjawisko odrywania się wirów Benarda-Karmana.

Odporność konstrukcji na zjawisko rezonansu wiąże się ze zdolnością tłumienia drgań. Tłumienie drgań oznacza obniżenie wielkości zmiennej charakteryzującej drgania, np. przemieszczenia, wskutek rozproszenia energii mechanicznej (Beards, 1996). W konstrukcji o niskiej zdolności tłumienia może dojść do powstania dużych przemieszczeń, wskutek których obciążony wymuszeniem obiekt może doznać uszkodzenia lub nawet zniszczenia. Dlatego ważna jest wiedza na temat zdolności tłumienia konstrukcji. Zdolność konstrukcji do tłumienia drgań opisuje się najczęściej za pomocą logarytmicznego dekrementu tłumienia (LDT):

$$\Delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (3)$$

gdzie A_n i A_{n+1} oznaczają wartości kolejnych amplitud drgań w tym samym kierunku dla ruchu harmonicznego tłumionego.

Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia wykorzystywana jest także do obliczania liczby Scrutona, którą wyraża podatności obiektu na drgania (Dulińska i Kawecki, 2011):

$$Sc = \frac{2\Delta m}{\rho b^2} \quad (4)$$

gdzie: m - oznacza masę równoważną konstrukcji na jednostkę długości przy drganiach z i -tą postacią drgań, b – szerokość odniesienia przekroju poprzecznego, a ρ – oznacza gęstość powietrza.

Obowiązujące euronormy narzucają wysokie reżimy zabezpieczenia stalowych kominów przed wpływem drgań własnych wywołanych rezonansem wiatrowym. W wielu wypadkach ich spełnienie możliwe jest jedynie dzięki zastosowaniu tłumików drgań, np. tłumików masowych. Mechaniczne tłumiki drgań projektowane są indywidualnie dla każdego komina z uwzględnieniem jego parametrów technicznych i rozwiązań konstrukcyjnych. Wartości modelowe częstotliwości drgań i LDT konstrukcji, które nie są w stanie uwzględnić wszystkich zmiennych mających znaczenie dla wyniku końcowych obliczeń, różnią się od rzeczywistych parametrów opisujących odpowiedzi dynamiczne konstrukcji. Z tego względu masowe tłumiki przygotowywane są z pewną rezerwą i wymagają strojenia na obiekcie, aby właściwie (optymalnie) realizować dyssypację energii obsługiwanej konstrukcji. W tych przypadkach zaleca się podejście oparte o zasadę projektowania wspomaganego badaniami, co sprowadza się do wyznaczania charakterystyk dynamicznych na drodze badań rzeczywistych obiektów. Szczególnie wartość dekrementu tłumienia, w przypadku wyposażenia konstrukcji w urządzenia tłumiące drgania, powinna zostać wyznaczona z zastosowaniem metod teoretycznych i doświadczalnych.

Zakres częstotliwości odpowiedzi konstrukcji na wzbudzenie wiatrowe mieści się w

zakresie od 0,1 Hz do 10 Hz. Najważniejsze wymagania dotyczące pomiaru drgań zawarte w normie ISO 4866:2010, szczególnie istotne z punktu widzenia niniejszej pracy, są następujące:

- pomiar amplitudy drgań powinien być prowadzony w sposób ciągły, przez wystarczająco długi czas, z dokładnością pozwalającą na wyodrębnienie zawartości widmowej,
- próbkowanie powinno być wykonane z częstotliwością przynajmniej pięć razy większą niż najwyższa częstotliwość drgań podlegająca analizie,
- system pomiarowy powinien pozwalać oszacować częstotliwość drgań z błędem $\pm 0,5\%$, a tłumienie z błędem $\pm 20\%$.

W przywołanym artykule przedstawiono wyniki badań testowych przeprowadzonych na nowo budowanym kominie stalowym o wysokości 60 m, wyposażonym w dwa mechaniczne tłumiki masowe (z wewnętrznym tłumieniem cieczowym). W pomiarach zastosowano trzy urządzenia pomiarowe: akcelerometr MEMS (częstotliwość próbkowania 50 Hz), naziemny radar interferometryczny IBIS-S (200 Hz) oraz tachymetr Leica Nova MS50 Multistation (10 Hz) (rys. 42). Na podstawie uzyskanych wyników dokonano wyznaczenia rzeczywistych wartości charakterystyk dynamicznych komina w stanie zablokowanych i zwolnionych tłumików. Dokonano walidacji wyników modelowania i wartości uzyskanych wszystkimi narzędziami pomiarowymi. W oparciu o uzyskane wyniki dokonano strojenia tłumików, wykazując kolejnymi pomiarami skuteczność ich pracy. Na bazie uzyskanych wyników wykazałem przydatność i ograniczenia narzędzi pomiarowych w zdefiniowanym zagadnieniu pomiarowym, mających zastosowanie praktyczne.

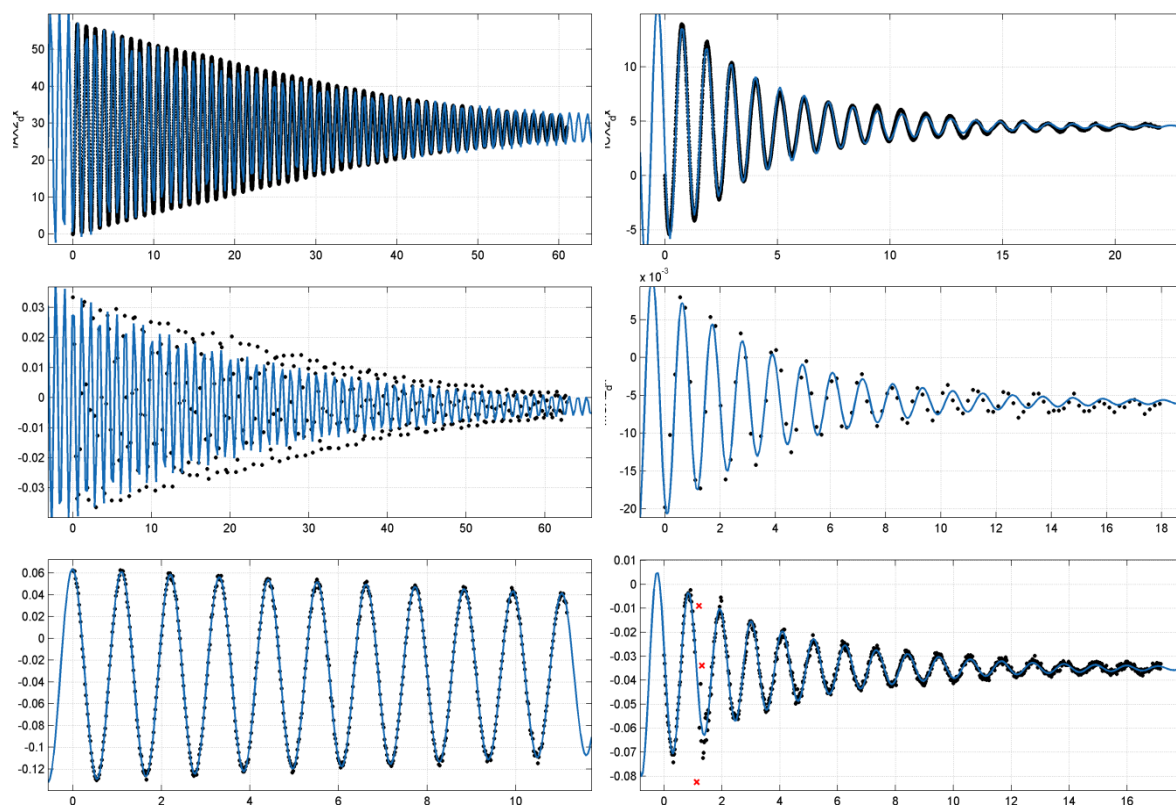


Rys. 42. Ustawienie instrumentów względem badanego komina, komin z zamontowanym tłumikiem oraz jego przekrój techniczny (źródło: publikacja nr 13)

Opracowanie wyników pomiaru polegało na wpasowaniu funkcji ciągłej w zbiór wartości dyskretnych, według równania (5) (rys. 43). Do tego celu użyto regresji nieliniowej wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów do wpasowania modelu.

$$y = A \cdot \exp(-\beta t) \cdot \sin(\omega t + \varphi) + c \quad (5)$$

gdzie: A oznacza maksymalną amplitudę ruchu, β – współczynnik tłumienia drgań, t – czas, ω – częstość kołową drgań, φ – fazę ruchu, a c – stałą wartość sygnału.



Rys. 43. Obserwacje zarejestrowane podczas wzbudzenia drgań nietłumionych przy użyciu: a) radaru IBIS, b) tachymetru MS50, c) akcelerometru; oraz drgań tłumionych przy użyciu: d) radaru IBIS, e) tachymetru MS50, f) akcelerometru (czerwone punkty oznaczają obserwacje odstające) (źródło: publikacja nr 13)

Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobre dopasowania funkcji modelowych do danych dyskretnych w przypadku obserwacji wykonanych radarem i akcelerometrem. Wyrażając je za pomocą jednostek, w których prowadzony był pomiar, nie przekraczają one odpowiednio 1 mm i 2 mm/s². W przypadku obserwacji tachymetrycznych, o wyraźnie niższej częstotliwości próbkowania, dopasowanie jest gorsze i mieści się w zakresie od 1 do 6 mm. Na podstawie wpasowania funkcji wyznaczono parametry funkcji: A , β , ω , φ , c , wraz z ich błędami. Wartości β i ω posłużyły do obliczenia częstotliwości drgań własnych f komina oraz logarytmicznego dekrementu tłumienia Λ na podstawie prostych równań:

$$f = 1/T = \omega / 2\pi \quad (6)$$

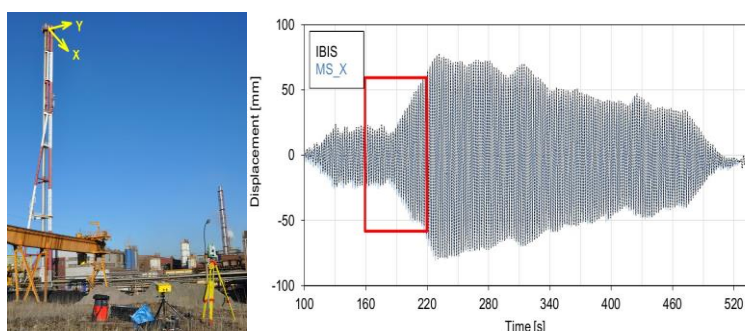
$$\Lambda = \beta T = \beta / f \quad (7)$$

Błędy tych wartości (m_f i m_Λ) zostały określone zgodnie z prawem przenoszenia błędów w oparciu o błędy parametrów β i ω wyznaczone za pomocą regresji nieliniowej. Wartości błędów obliczone na podstawie wpasowania funkcji w zbiór obserwacji w większości przypadków spełniają wymogi normy i nie przekraczają odpowiednio wartości 0,5% i 20%. Wartości obliczone dla obserwacji radarem interferometrycznym IBIS oraz akcelerometrem są wielokrotnie mniejsze od normowych. Natomiast w przypadku tachymetru MS50 wymogi norm nie są spełnione dla kilku przypadków, szczególnie przy silnym tłumieniu drgań. Można przypuszczać, iż jest to efekt zarejestrowania zbyt małego zbioru obserwacji ze względu na szybkie zanikanie zjawiska i niską częstotliwość próbkowania.

Aby ugruntować powyższe wnioski, zbiór doświadczeń poszerzyłem o kolejny

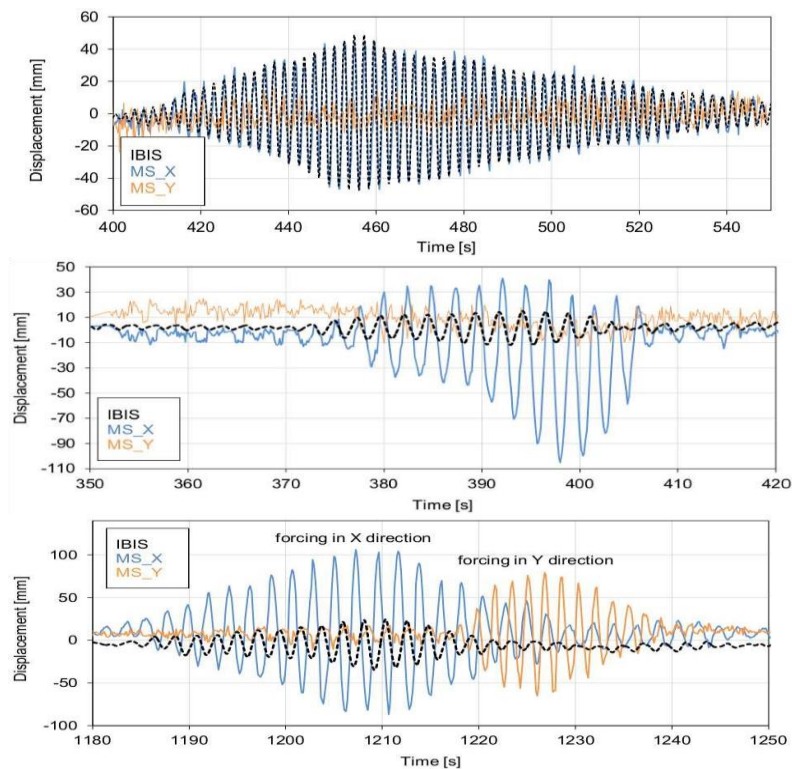
przypadek, opisany w publikacji nr 14 pod tytułem „*Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods*”. Istnieje wiele konstrukcji kominów i sposobów ich zabezpieczania tłumikami różnej konstrukcji. W publikacji zaprezentowano wyniki pozyskane na 120-metrowym stalowym kominie o nietypowej konstrukcji wsporczej, co czyni ją asymetryczną. Tym samym konstrukcja ma różne częstotliwości wibracji na kierunku głównym i prostopadłym. Komin był wyposażony w mechaniczny tłumik drgań w postaci wahadła o dużej masie, który podczas prac eksploatacyjnych wykazał ograniczenia w skutecznym tłumieniu drgań, co zakończyło się awarią i koniecznością wymiany na 3 tłumiki masowe. Pomiary we współpracy z jednostkami projektowo-montażowymi zrealizowano w taki sposób, aby możliwe były badania weryfikujące charakterystyki dynamiczne komina w stanie nietłumionym, tłumionym tłumikiem mechanicznym i nowo montowanymi tłumikami masowymi. Nowy tłumik skonstruowano w taki sposób, aby wykazywał skuteczność tłumienia niesymetrycznych charakterystyk dynamicznych konstrukcji. Istotną częścią publikacji jest metodyka przeprowadzenia obserwacji tak, aby zaobserwować zarówno ruch komina jak i wahadła masy swobodnej oraz tłumika masowego.

Problem ten rozwiązano poprzez zastosowanie dwóch systemów pomiarowych: radaru interferometrycznego GB-SAR i tachymetru zrobotyzowanego z funkcją automatycznego śledzenia celu ATR. W celu wyeliminowania przesunięcia czasowego i synchronizacji obserwacji z obu technik na etapie przetwarzania danych, zastosowano lokalne impulsowe wzbudzenie. Wykazano tym samym wysoką zgodność danych, co jest niezwykle istotne ze względu na wynik dalszych obserwacji (rys. 44).



Rys. 44. Obiekt badań oraz rezultaty zsynchronizowanych danych GB-SAR i ATR (źródło: publikacja nr 14)

Przeprowadzony eksperyment główny na zablokowanych obu tłumikach wykazał zgodność wskazań obu systemów co do wartości amplitud (rys. 45a). W momencie odblokowania tłumika opartego o wahadło swobodne z dużą masą (na nim zamontowano pryzmat dalmierczy) i po wywołaniu wzbudzenia zaobserwowano silny wzrost amplitud dla ruchu masy wahadła, ale przesunięcie fazowe jego drgań względem drgań konstrukcji komina było przesunięte o 50° . (rys. 45b). Zmiana tłumika na masowy i obserwacja zachowań jego wahadła względem komina wykazuje silną reakcję oraz wzrost amplitud wahadła i regularny ich kształt, a przesunięcie wynosi 205° (rys. 45c), czyli jest przeciwne do drgań konstrukcji, co było efektem pożądanym ze względu na potrzeby obiektu poddanego zabezpieczeniu. Wykazałem pełne przygotowanie geodezji jako dziedziny wyposażonej w wiedzę i umiejętności oraz odpowiednią technologię, dla wsparcia procesów weryfikacji charakterystyk dynamicznych i strojenia tłumików drgań obiektów wysmukłych na przykładzie stalowych kominów przemysłowych.



Rys. 45. Obserwacje zarejestrowane podczas wzbudzenia drgań: a) bez tłumienia, b) tłumionych wahadłem masy swobodnej, c) tłumionych tłumikiem masowym (źródło: publikacja nr 14)

8. Podsumowanie

W obszarze geodezyjnych technik pomiarowych ostatnie dwie dekady to dynamiczny rozwój bezkontaktowych metod wykorzystujących zjawiska falowe. W dużej mierze zdalne metody pomiarowe interesujące geodetów obejmują bezpośrednie pomiary geometrii otoczenia, niemniej jednak coraz częściej uwagę zwracają również techniki teledetekcyjne i rozważania w zakresie uzyskiwanych przy ich użyciu informacji. Technologicznie zaawansowane narzędzia pomiarowe spowodowały, że środek ciężkości współczesnych rozważań naukowych w geodezji przesunął się w kierunku obszarów związanych z kwestią przetwarzania dużych ilości sygnałów cyfrowych niosących informację pomiarową. Silnie rozwijają się prace badawczo-wdrożeniowe nad mobilnością i automatyzacją procesów. Kluczową kwestią jest interpretacja wyników, modelowanie i predykcja zjawisk oparta o tak pozyskane informacje.

Moja działalność w pełni wpisuje się w tę przestrzeń, a obszarem dociekań są radarowe techniki pomiarowe GPR i GB-SAR należące do grupy metod teledetekcji bliskiego zasięgu. Sam pomiar nowoczesnym urządzeniem nie jest dziś zadaniem oryginalnym, szczególnie w sytuacji dostępności produktów na rynku. Praca tymi narzędziami wymaga jednak zachowania krytycznego i wyważonego podejścia do potencjalnych możliwości metod zdalnych. Jako istotny obszar badawczy można wskazać weryfikację technik pomiarowych i jakości dostarczanych nimi informacji. Jak wykazałem w publikacjach, temat dotyczy szczególnie metody georadarowej, która służy do obserwacji przestrzeni zakrytej, a tym samym trudno weryfikowalnej. Ostrożność, zwłaszcza na etapie interpretacji wyników, zalecana jest ze względu na złożoność propagacji sygnału, która jest zależna od parametrów fizycznych ośrodka propagacji. Nie oznacza to, iż metodę należy odrzucić, gdyż nawet jeśli jej skuteczność

wynosi tylko 50%, to jednak więcej o 50% niż bez wykonania takich badań. Ponadto nawet uzyskany wynik negatywny jest wskazaniem na właściwe ukierunkowanie dalszych działań albo dobór innej metodyki pomiarowo-badawczej.

Odwrotnie jest z metodą naziemnej interferometrii radarowej, która oferuje dokładność pomiarową wykraczającą poza zakres klasycznych instrumentów geodezyjnych. Jest dedykowana monitorowaniu obiektów budowlanych w przypadku oddziaływań obciążeń statycznych i dynamicznych. Włączenie jej w poczet metod geodezyjnych również wymaga weryfikacji w celu ustalenia realnych dokładności z uwzględnieniem warunków pomiarowych i specyfiki obiektów poddawanych kontroli. Dlatego w swoich pracach przeprowadziłem szereg eksperymentów właśnie terenowych, niejednokrotnie odwołując się do znanych, pewnych metod referencyjnych celem weryfikacji nowych rozwiązań pomiarowych.

To właśnie analizy terenowych badań testowych stanowią o sile przedstawionego dorobku. Jak wykazałem w publikacjach, wyniki niejednokrotnie uwiarygodniły ograniczenia albo nazbyt optymistyczne założenia umocowane w podstawach teoretycznych i zasadach modelowania. Natomiast pomiar bezpośredni jest przekonującym weryfikatorem założeń teoretycznych i modelowych. Przedstawione wyniki analizy i postawione wnioski mogą stanowić istotne wskazanie dla wykonawców badań w celu ich właściwej realizacji, co jest głównym celem prac habilitanta.

W publikacji **„Automation of the integration process of georadar and geodetic data acquired with the integrated GPR-GPS system or GPR-TCA type tachymeter”** podałem pełną procedurę wprowadzania korekt geometrycznych podnoszących dokładność pozycjonowania obiektów podpowierzchniowych lokalizowanych georadarem, dla których w sposób zintegrowany wyznaczono pozycję metodami geodezyjnymi. Wypracowałem i podałem schemat blokowy dla algorytmu łącznego przetwarzania danych geodezyjnych i georadarowych, co pozwoliło na opracowanie oprogramowania automatyzującego proces korekcji geometrycznej dla wektoryzowanej treści interpretowanej na echogramach. W przeprowadzonych badaniach testowych wykazałem poprawność funkcjonowania zaproponowanych procedur i oszacowałem dokładność wyjściową pracy systemu GPR-GPS lub GPR-TCA. Rozwiązania te wypracowałem już dekadę temu i podałem w publikacjach. Mimo to polski rynek usług geodezyjnych, a także geofizycznych, dopiero dziś coraz przychylniej rozważa implementację takich rozwiązań w wydaniu czysto komercyjnym. Wypracowane przeze mnie procedury przetwarzania skutkowały tym, iż w zapisach projektu *„Wytucznych badań podłoża budowlanego w drogownictwie”* wprowadzono obowiązek realizacji badań GPR z geopozycjonowaniem geodezyjnym.

W kolejnej publikacji **„Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową”** zaproponowałem rozwinięcie algorytmu i konwersję geopozycjonowanych danych georadarowych do postaci chmur punktów, tworząc pojęcie podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning – UgRS*). Wykazałem znaczenie takiego przetwarzania danych georadarowych jako istotnego czynnika umożliwiającego prowadzenie zaawansowanych analiz badawczych na przykładzie rozpoznania zjawisk krasowych metodą GPR. W oparciu o badania terenowe i analizy wyników pomiarów GPR i TLS jaskini (jako przykładu pustki naturalnej lub pogórnicej) przeprowadziłem weryfikację geometrycznych aspektów metody GPR. Dzięki takim danym wykonałem w pełni udokumentowaną analizę w zakresie optymalizacji procedur filtracji danych georadarowych. Podałem zweryfikowaną, autorską sekwencję procedur filtracji. Zastosowałem procedury wychodzące znacznie poza standardowe przetwarzania, a mające związek z kwestią geometryczną danych GPR. Zweryfikowałem również relację pomiędzy

teoretyczną a praktyczną rozdzielczością metody georadarowej. Wykazałem rozbieżności ujawniające się w modelowaniu danych georadarowych metodą FDTD a wynikami obrazowań rzeczywistych.

W publikacjach ***„Importance of selecting parameters of georadar profiles in karst area”*** oraz ***„Ocena wpływu wybranych parametrów profilowań georadarowych w badaniach podłoża gruntowego dla potrzeb budownictwa na przykładzie zrębu Zakrzówka”*** zespół pod moim kierownictwem wykazał na bazie analizy wyników odpowiednio skonstruowanych eksperymentów terenowych istotne znaczenie właściwego doboru parametrów stosowanych w pomiarach radarowych realizowanych na potrzeby budownictwa drogowego. Jest to publikacja, która jednoznacznie wskazuje, iż wykonawcy badań mają wpływ na możliwość poprawy uzyskiwanych rezultatów, jeśli dysponują odpowiednim sprzętem i wyjdą poza standardowe parametry pomiarowe. Zweryfikowane wyniki stały się podstawą do określenia parametrów prowadzenia badań GPR wprowadzonych przez zespół do zapisów projektu ***„Wytycznych badań podłoża budowlanego w drogownictwie”*** obecnie wdrażanych w GDDKiA jako największego inwestora w kraju.

„Assessing of the effect of selected parameters of GPR surveying in diagnosis of the condition of road pavement structure” jest kolejną, trzecią publikacją zawierającą wyniki moich dociekań w obszarze stosowania metody GPR w badaniu konstrukcji nawierzchni drogowych. Przedstawiłem w niej usystematyzowane wyniki oceny wpływu parametrów pomiarowych i aparaturowych na rezultaty rozpoznania warstw konstrukcji nawierzchni drogowych. Wykazałem to również w oparciu o zestawienia liczbowe i analizy statystyczne danych GPR. Statystyczne podejście do danych georadarowych jest niezwykle trudne, zwłaszcza w badaniu form naturalnych, ze względu na nieusystematyzowany układ warstw i fizykę pomiaru. Natomiast jednoznaczność warstw konstrukcji drogowych umożliwiła mi przeprowadzanie takich zestawień. W badaniach wykazałem, iż jednostki radarowe nawet tego samego producenta dały różne wskazania rejestracji czasowych odpowiedzi rozpoznawanych warstw. Ma to fundamentalne znaczenie w procesie konwersji głębokościowej danych georadarowych. Wskazałem tym samym, że w pomiarach georadarowych nastawionych na weryfikację głębokości bezwzględnie wymagana jest niezależna kalibracja każdej aparatury i nie można posługiwać się prędkością wynikającą z rozpoznania tylko jednej z nich.

Publikacje ***„GPR identification of prestressing tendons in areas with high density of ordinary reinforcement”*** i ***„Identification of prestressing tendons using ground penetrating radar in particular the anchorage zone”*** prezentują pełną weryfikację skuteczności metody GPR w zakresie inwentaryzacji mostowych obiektów o konstrukcji sprężonej. Znamiennej wartością publikacji jest kompleksowa weryfikacja zrealizowana w warunkach polowych w różnych fragmentach wiaduktu drogowego o ustroju nośnym stanowiącym jednokomorową pięcioprzęślową skrzynkę sprężoną o schemacie statycznym belki ciągłej. Wskazałem możliwości i ograniczenia detekcji zbrojenia miękkiego, osłon cięgien i kabli sprężających z zastosowaniem anten o częstotliwości 1000 MHz. Wykazałem, że mimo potencjału wynikającego z rozdzielczości metody, w warunkach silnego zbrojenia typowego dla dewiatorów nie osiągnięto zadowalającego wyniku, co bez problemu jest możliwe w obszarach o mniejszym stopniu zagęszczenia zbrojenia miękkiego. Przedstawiłem natomiast obiecujące wyniki w zakresie detekcji zbrojenia zabezpieczającego i głowic cięgien kabli sprężających. Podane przeze mnie wyniki doświadczeń wskazują na zasadność dalszych badań weryfikacyjnych ponad zakres częstotliwości 1000 MHz, która w podanych przypadkach wykazała ograniczenia mimo teoretycznego potencjału.

W publikacji „**Identification of concrete voids in an untypical railway bridge pillar by Ground Penetrating Radar method**” wykazałem korzystne wyniki stosowania metody georadarowej i anten częstotliwości 1000 MHz w zakresie badań zmierzających do oceny nośności niewłaściwie zrealizowanych kolejowych podpór mostowych. Zaprezentowałem pełną metodykę nie tyle prowadzenia badań terenowych, co ich przetwarzania w dziedzinie czasu i częstotliwości. Wskazałem sposób i zasadność wykorzystania potężnego narzędzia wspomagania badań georadarowych – badań nieniszczących, jakim jest modelowanie pola falowego metodą FDTD. Zaproponowana metodyka korelacji wyników modelowych i terenowych okazała się skuteczna. Na bazie przygotowanych przeze mnie map rozkładu zidentyfikowanych jednoznacznie pustek pracownicy Katedry Mechaniki Mostów Politechniki Śląskiej dokonali odpowiednich obliczeń MES dla wyznaczenia zmian rozkładu naprężeń i wprowadzili proces naprawczy.

Artykuł „**Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurement**” to fundamentalne opracowanie zrealizowane dla oceny rzeczywistych dokładności wyznaczania przemieszczeń naziemnym radarem interferometrycznym IBIS-S. Mój wkład w publikację to koncepcja i przygotowanie pełnej procedury eksperymentu podstawowego. Dla jego realizacji zaprojektowałem, przygotowałem oraz zweryfikowałem stanowisko pomiarowe umożliwiające realizację kontrolowanych przemieszczeń o dokładności na poziomie 0,025 mm. W oparciu o tak przygotowaną i zweryfikowaną przeze mnie bazę zweryfikowano oprócz systemu IBIS również przygotowany przez zespół naukowy Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki wizyjny system monitoringu przemieszczeń i drgań konstrukcji. Przeprowadzana z moim udziałem analiza tego testu uwiarygodniła wyniki pomiarów ugięć oboma systemami pomiarowymi. W obu przypadkach test stanowi dowód na poprawność wyznaczania ugięć przęseł obiektów mostowych, co otworzyło drogę dla wdrażania metody GB-SAR do pomiarów odbiorczych mostów.

Wdrożeniowy aspekt badań radarowych dla oceny odbioru obiektów mostowych ukazuje publikacja „**Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry - case study**”. To wyjątkowa publikacja, która prezentuje pierwsze w Polsce zastosowanie jednostki radarowej w działaniach komercyjnych odbioru nowego mostu. Przetawione wyniki bardzo dobrze dokumentują skuteczność metody GB-SAR. W eksperymencie dla kontroli zastosowano inne geodezyjne narzędzia pomiarowe. Mój wkład obejmował przeprowadzenie analiz z konfrontacji metod geodezyjnych i częściowo radarowych, zarówno w zakresie testów statycznych, jak i dynamicznych. Opracowane z moim udziałem dane wykazały dużą korelację przemieszczeń dla różnych systemów pomiarowych. Uwidocznili też odstępstwa częstotliwości drgań własnych konstrukcji względem danych z analizy modalnej. Wyniki tych testów przekonały akredytowane laboratoria badawcze o skuteczności systemu IBIS-S i zaowocowały współpracą w zakresie badań odbiorczych obiektów mostowych przy obserwacji reakcji obciążeniowych przęseł nurtowych.

Jedenasta publikacja to rozdział w monografii „**Wybrane problemy geodezji inżynierskiej**” zatytułowany „**Identyfikacja elementów sceny radarowej na podstawie danych z naziemnego skaningu laserowego**”. Jest to bardzo ważna publikacja ze względu na przedstawioną metodykę wyznaczania relacji geometrycznych obiekt-radar. Relacje te są podstawą wyznaczania współczynnika redukcji przemieszczeń rejestrowanych przez jednostkę radarową ustawioną pod pewnym kątem do kierunku rzeczywistego przemieszczenia (horyzontalnego lub wertykalnego). Zaproponowana autorska metodyka będąca wynikiem wielu doświadczeń terenowych wskazuje, iż optymalnym rozwiązaniem podczas prac są obserwacje terenowe z zastosowaniem technologii TLS. Proponowane rozwiązanie okazało się

wizjonerskie, gdyż takie podejście prezentują od niedawna nowe jednostki producenta radaru IBIS-S.

Monografia „***Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry***” i rozdział „***Surveying of static displacement and vibration of high structures***” to kompleksowe studium zastosowania techniki GB-SAR w badaniu zachowań obiektów wysmukłych. Opisałem w nim wyniki eksperymentów dowodzących możliwości prowadzenia obserwacji wpływu obciążeń insolacją na żelbetowy komin przemysłowy w trybie całodobowym. Przedstawiłem koncepcję obserwacji wychyleń komina z zastosowaniem dwóch jednostek radarowych w analogii do klasycznych obserwacji geodezyjnych. Wykazałem brak skuteczności takich pomiarów dla konstrukcji kratowych, jakimi są stalowe maszty komunikacyjne. Badania empiryczne potwierdziły możliwość obserwacji podobnych konstrukcyjnie wież, ale pod warunkiem montażu reflektorów mikrofalowych. Znamienną częścią pracy są badania nad wiarygodnością wyznaczania częstotliwości drgań obiektów wysmukłych. Na bazie jedynych w Polsce pomiarów porównawczych tego typu, prowadzonych równocześnie radarem GB-SAR i akcelerometrami MEMS, wykazałem bardzo wysoką korelację wyznaczanych częstotliwości, pomimo zastosowania urządzeń bazujących na odmiennych zjawiskach fizycznych. Przedstawiłem szerokie rozważania nad odpowiedzią dynamiczną basztowych wież wyciągowych. Wskazałem na możliwości zastosowania technologii GB-SAR do oceny reakcji konstrukcji na obciążenia eksploatacyjne maszyn wyciągowych i powstawanie zjawiska dudnień, które może wpływać negatywnie na żywotność konstrukcji.

W ostatnich dwóch pozycjach publikacyjnych „***Vibration measurements of steel chimneys equipped with mass dampers, using interferometric radar, robotic total station and accelerometer***” i „***Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods***” przedstawiłem efekty eksperymentu i wdrożenia na szeroką skalę zarówno badań z zastosowaniem GB-SAR, jak i tachymetrów zrobotyzowanych, do strojenia tłumików masowych instalowanych na stalowych kominach przemysłowych. Wyzaczyłem rzeczywistą częstotliwość pracy tachymetrów zmotoryzowanych nowej generacji, które wykazują przydatność do obserwacji dynamicznych w myśl zapisów norm ISO 4866:2010. Realizując aproksymację harmoniczną krzywej tłumionej w zbiory danych, wyznaczyłem parametry podstawowych charakterystyk dynamicznych komina. Podałem również błędy uzyskanych wartości, wykazując pewne ograniczenia tachymetrów. Badania pozwoliły zweryfikować działania niekomercyjnego czujnika przyspieszeń jednej z nielicznych polskich firm, która zajmuje się konstrukcją i montażem oraz strojeniem tłumików masowych i uczestniczyła w badaniach. Wykazane zgodności sprawiły, iż wraz z tą firmą zrealizowano kolejne prace już o charakterze wdrożeniowo-eksperymentalnym. Na potrzeby tych prac przedstawiłem metodykę prowadzenia badań dla komina o niesymetrycznej charakterystyce drgań. Prace prowadzono na jednym z najwyższych stalowych kominów w Polsce. Metodyka ta skutecznie pozwoliła zweryfikować działanie dwóch niezależnych tłumików, co stanowiło wyjątkową okoliczność eksperymentalną. Niezwykle rzadko zdarza się skonfrontować dwa skrajnie różne co do konstrukcji systemy tłumiące na jednym kominie. W analizie wykazałem ograniczoną i zaskakującą reakcję tłumika opartego o wahadło z podwieszoną masą. Stosując przedstawioną metodykę i podejście obliczeniowe, wykazałem, iż geodezyjne metody pomiarowe pozwalają na wsparcie działań diagnostycznych w omówionym zakresie.

Reasumując, za istotny i twórczy uważam całokształt moich przytoczonych działań, które skutkowały wdrożeniem metod radarowych z podaniem ich ograniczeń i możliwości w

obszarze geodezji, a szczególnie geodezji inżynieryjno-przemysłowej ukierunkowanej na obsługę budownictwa.

9. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Przedstawione w cyklu publikacje obejmują tylko część artykułów o tematyce georadarowe przygotowanych z moim udziałem, które są efektem badań jakie prowadziłem w kooperacji z różnymi naukowcami AGH, ale również PAN. Były to prace badawcze realizowałem w ramach projektów naukowych:

1. KBN 5 T12E 009 22: „Badania geodezyjno-grawimetryczne górotworu solnego poddanego deformacjom o charakterze geodynamicznym jako element oceny przydatności terenu pogórniczego dla potrzeb zagospodarowania przestrzennego”. 03-01-2002 – 28-07-2005, **wykonawca**,
2. KBN 4 T12 048 27 „Wykorzystanie zintegrowanego systemu GPR-GPS w procesie uzupełniania treści map tematycznych struktur podpowierzchniowych”, 11.03.2004 – 11.02.2007, **wykonawca**,
3. KBN 5 T12B 015 25 „Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych” 30-09-2003 – 29-06-2005, **współpracownik**,
4. KBN 4 T12B 015 30 „Wpływ rozdzielczości metod falowych na jakość rozpoznania granic nieciągłości osuwiska” 2006-05-05 2008-04-05, **współpracownik**.

Rezultaty badań zamieszczono w publikacjach:

- Z. SZCZERBOWSKI, RADOMIŃSKI, **Ł. ORTYL**: *Wstępne wyniki badań uwarunkowań i skutków nowopowstałego zapadliska w Inowrocławiu*, Geotechnika i budownictwo specjalne 2004: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu: Zakopane, 14–19 marca 2004. T. 1 / red. Danuta Flisiak; Wydawnictwo KGBiG AGH, 2004. — S. 531–540.
- Z. SZCZERBOWSKI, J. ZIĘTEK, **Ł. ORTYL**: *Wykorzystanie metody georadarowej w ocenie skutków działalności górniczej na przykładzie Inowrocławia*, WUG (Katowice) / Wyższy Urząd Górniczy; ISSN 1505-0440. — 2005. nr 6 s. 50–52.
- pod red. E. POPIOŁKA i Z. PILECKIEGO; [aut.] J. OSTROWSKI, Z. FAJKEWICZ, A. Kotyrba, G. Mutke, E. STEWARSKI, A. WRÓBEL, J. Chojnacki, **Ł. ORTYL**, J. RADOMIŃSKI, R. Siata, A. WÓJCIK: *Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2005. — 148 stron.
- red. nauk. Z. PILECKI; zespół aut.: E. POPIOŁEK, Z. PILECKI, J. KARCZEWSKI, J. ZIĘTEK, J. Kłosiński, A. Baranowski, E. Pilecka, **Ł. ORTYL**, J. Pszonka, K. Krawiec: *Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska*, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „ART-TEKST”, 2008. — 97, [1] s. ISBN 978-83-88316-81-4.
- **Ł. ORTYL**, M. SOŁTYS: *Integrated of programs in the process of subsurface infrastructure location with the radar method*. Reports on Geodesy; ISSN 0867-3179. — 2005 no. 3 s. 27–33.
- J. GOCAŁ, **Ł. ORTYL**, M. SOŁTYS: *Processing of images recorded by the radar method, aimed at construction of metric 3D models of subsurface objects and structures*.

Geodezja i Kartografia. — 2006 vol. 55 no. 1 s. 47–56.

- J. GOCAŁ, **Ł. ORTYL**, M. SOŁTYS, P. WĄSIK: *Methodology of terminally guided georadar-tacheometer surveying kit exploitation in the process of localisation of underground elements and completion of thematic maps' content*. Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission. Geodesy / Polish Academy of Sciences. Cracow Branch ISSN 0079-3299; 43 — S. 5–17.
- **Ł. ORTYL**, M. SOŁTYS: *The georadar method: an assessment of efficiency of subsurface conduits position determination on selected test fields*. Reports on Geodesy; ISSN 0867-3179. — 2007 no. 1 s. 225–232.
- A. WRÓBEL, **Ł. ORTYL**: Georadarowa i termowizyjna metoda pozyskiwania geodanych o pustkach podpowierzchniowych — Georadar and termovision method of acquiring geodata about subsurface voids. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji = Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing; ISSN 2083-2214. — 2007 vol. 17b s. 821–830. — Bibliogr. s. 829, Streszcz., Summ. — ISBN 978-83-920594-9-2, 4 punkty na rok wydania,

Podobnie sytuacja wygląda w zakresie naziemnej interferometrii radarowej, gdzie uczestniczyłem w projekcie MNiSW N N526158838 „Opracowanie zasad wyznaczania drgań i przemieszczeń budowli inżynierskich z wykorzystaniem interferometrii radarowej”, 09-03-2010 – 08-03-2013. W ramach wspomnianego projektu wykonano znacznie większą ilość badań niż przedstawiona w pozycjach cyklu niejednokrotnie do współpracy z jednostkami projektującymi, wykonującymi masowe tłumiki drgań i realizującymi obciążenia próbne mostów. Rezultat badań został przedstawiony w publikacji:

- J. GOCAŁ, A. BAŁUT, R. KOCIERZ, P. KURAS, **Ł. ORTYL**, T. OWERKO, A. Rączka, M. STRACH, R. Szpyra: *Precyzyjne pomiary drgań budowli przy użyciu naziemnego radaru interferometrycznego*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji; ISSN 2083-2214. — 2009 vol. 19 s. 123–142.
- R. KOCIERZ, P. KURAS, T. OWERKO, **Ł. ORTYL**: *Assessment of usefulness of radar interferometer for measuring displacements and deformations of dams*. Proceeding of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring [Dokument elektroniczny] : 2–4 November 2011, Hong Kong, China. — 1 dysk optyczny. — S. [1–7].
- P. KURAS, T. OWERKO, **Ł. ORTYL**, R. KOCIERZ, O. SUKTA, S. Pradelok: *Advantages of radar interferometry for assessment of dynamic deformation of bridge*. Bridge maintenance, safety, management, resilience and sustainability: proceedings of the sixth international conference: Stresa, Italy, 8–12 july 2012 / eds. Fabio Biondini, Dan M. Frangopol. — Boca Raton; [etc.]: CRC Press, cop. 2012. — ISBN 978-0-415-62124-3. — S. 197. — Bibliogr. s. 197. — Pełny tekst na dołączonym CD-ROMie. — S. 885–891.
- P. KURAS, **Ł. ORTYL**: *Selected geometric aspects of planning and analysis of measurement results of tall building structures using interferometric radar*. Geomatics and Environmental Engineering. — 2014 vol. 8 no. 3, s. 77–91.
- **Ł. ORTYL**, P. KURAS, M. Kędzierski, P. Podstolak: Metody pomiaru częstotliwości drgań własnych i logarytmicznego dekrementu tłumienia kominów stalowych w sytuacjach wymaganych przez Eurokody, Materiały Budowlane: technologie, rynek, wykonawstwo. — 2015 nr 9, s. 107–109.

Moje zainteresowania metodami badań bezkontaktowych obejmują również termografię w podczerwieni. Popołnione przeze mnie współautorskie prace koncentrowały się na wykazaniu nie tylko jakościowego, ale również ilościowego charakteru badań termowizyjnych. Realizowałem je zarówno w skali mikro takim jak sieci ciepłownicze zakładów przemysłowych, ale również makro dla typowych przegród obiektów budowlanych. W tym drugim aspekcie byłem zaangażowany jako wykonawca projektu MNiSW NN 526119133 „Opracowanie zasad ilościowego określania właściwości cieplnych przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termowizyjnej”, 08.11.2007 – 07.11.2010. Wyniki przedstawiono w publikacjach i rozdziale monografii:

- A. WRÓBEL, M. PIETROŃ, **Ł. ORTYL**: Termografia a systemy informacji terenowej. TTP 2002: Termografia i Termometria w Podczerwieni: V [piąta] krajowa konferencja: Ustroń, 14–16 listopada 2002 r. / pod red. Bogusława Więcka; Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej; Polski Komitet Optoelektroniki SEP. — Łódź: IE PŁ, 2002. — S. 397–402.
- A. WRÓBEL, A. WRÓBEL, T. Kisilewicz, **Ł. ORTYL**, A. KWARTNIK-PRUC, A. SZAFARCZYK, T. OWERKO, A. Rakoczy, K. Nowak: Ilościowe określanie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2011. — 151, ISBN: 978-83-7464-393-1.
- A. WRÓBEL, A. WRÓBEL, A. KWARTNIK-PRUC, **Ł. ORTYL**: Kamera termograficzna jako narzędzie do ilościowego określania gęstości strumienia ciepła. Pomiar, Automatyka, Kontrola; ISSN 0032-4140. — 2009 vol. 55 nr 11 s. 938–941.

W moim dorobku naukowym wyróżniam prace publikacje, które ujmują kwestie związane problematyką pomiarów prowadzonych dla monitoringu zmian geometrycznych realizowanych na obiektach inżynierskich. Wśród nich są prace na takich obiektach przemysłowych jak kominy i chłodni. Są też takie wyjątkowe konstrukcje jak teleskop wysokich energii promieniowania gamma (współpraca z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk) czy eksperymentalny sztuczny wał przeciwpowodziowy poddawany wielokrotnemu wyężeniu dla obserwacji reakcji wbudowanych w konstrukcje czujników monitoringu przemieszczeń i innych parametrów stan konstrukcji (np. parcia porowego). Obiekt zrealizowano w ramach projektu badawczego PBS1/B9/18/2013 (nr 180535) pt. Badania w zakresie opracowania kompleksowego systemu monitorowania stanu statycznego i dynamicznego ziemnych obwałowań przeciwpowodziowych w trybie ciągłym, z możliwością symulacji zachodzących zmian strukturalnych oraz szacowaniem ryzyka ich uszkodzenia (ISMOP), 2014- 2017. Obserwacji konstrukcji wału prowadzone były przez zespół pod moim kierownictwem. Odpowiadaliśmy za monitoring bezwzględnych przemieszczeń obiektu metodami klasycznej precyzyjnej geodezji i testowaną technologią GB-SAR, jako referencyjnymi dla wszystkich innych czujników. Wyniki tych działań przedstawiono w poniższych publikacjach a w przypadku pomiarów w ramach projektu ISMOP duża ilość danych dopiero teraz jest szeroko opracowywana.

- R. KOCIERZ, **Ł. ORTYL**: *Using reflectorless total stations in surveying of industrial chimney inclinations*. Geomatics and Environmental; ISSN 1898-1135. — 2010 vol. 4 no. 1/1 s. 43–55.
- T. OWERKO, R. KOCIERZ, P. KURAS, **Ł. ORTYL**, *Surveying control of the structure of a telescope for observing cosmic very-high-energy gamma rays*, W: JISDM 2016

[Dokument elektroniczny]: 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring: 30th March–1th April 2016, TU Wien / FIG, IAG, TU Wien. Austria, 2016. Dysk Flash. — S. 1–5.

- R. KOCIERZ, M. Rębisz, Ł. ORTYL, *Measurement point density and measurement methods in determining the geometric imperfections of shell surfaces*, Reports on Geodesy and Geoinformatics; ISSN 2391-8152. — 2018 vol. 105 iss. 1, s. 19–28.
- P. KURAS, Ł. ORTYL, T. OWERKO, A. BORECKA, *Measurement point density and measurement methods in determining the geometric imperfections of shell surfaces*, Reports on Geodesy and Geoinformatics [Dokument elektroniczny]. - Czasopismo elektroniczne; ISSN 2391-8152. — 2018 vol. 106 iss. 1, s. 9–18.

10. Bibliografia



- Annan A.P. 2000. Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors & Software.
- Annan A.P. 2001. Ground Penetrating Radar. Workshop Notes. Sensors & Software.
- Beards C.F. 1996. Structural Vibration: Analysis and Damping. Halsted Press.
- Bestyński Z., Pacanowski G., Sieński E. 2017. Badania geofizyczne i klasyfikacje geotechniczne w ocenie stateczności karpackich zboczy fliszowych. Przegląd Geologiczny, 65: 717–724.
- Bień J. 2010. Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Brownjohn J.M.W. 2007. Structural health monitoring of civil infrastructure. Philosophical Transactions of The Royal Society A. Mathematical, Physical & Sciences.
- Brownjohn J.M.W., Carden E.P., Goddard C.R., Oudin G. 2010. Real-time preference of tuned mass damper system for a 183 m reinforced concrete chimney. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98: 169–179.
- Cazzaniga N. E., Pinto L., Forlani G., Abruzzi P. 2005. Monitoring oscillations of slender Structures with GPS and accelerometers. Pharaohs to Geoinformatics. FIG Working Week 2005 and GSDI-8. Cairo.
- Chognard S., Dubois A., Benmansour Y., Torri E., Domer B. 2018. Digital Construction Permit: A Round Trip Between GIS and IFC, Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering EG-ICE. Advanced Computing Strategies for Engineering, 287–306
- CICIND 2001. Model Code for Concrete Chimneys.
- Cruz P., Topczewski Ł., Fernandes F., Trelab Ch., Lourenco P. 2010. Application of radar techniques to the verification of design plans and the detection of defects in concrete bridges. Structures and Infrastructure Engineering. United Kingdom, 6/4: 395–407.
- Czarniak P., Pacanowski G., Sobótka P. 2017. Zastosowanie badań konduktometrycznych z użyciem inwersji 1D, jako narzędzia do kartowania przestrzennego przypowierzchniowych warstw geologicznych, Przegląd Geologiczny, 65: 803–810.
- Dec J. 2010. High resolution seismic investigations for the determination of water flow directions during sulphur deposits exploitation, Acta Geophysica, 58: 5–14.
- Dulińska J., Kawecki J. 2011. Awarie i katastrofy budowli wywołane działaniami dynamicznymi. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie budowlane”, Międzyzdroje: 75–92.
- GDDKiA. 2008. Zalecenia dotyczące wykonywania badań pod próbnym obciążeniem drogowych obiektów mostowych. Załącznik do Zarządzenia Nr 35 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa.
- GDDKiA. 2010. System oceny stanu nawierzchni SOSN, Wytyczne Stosowania, Aktualizacja związana z wykorzystaniem wyników pomiarów ugięć nawierzchni, Warszawa
- Ghorbani-Tanha A.K., Noorzad A., Rahimian M. 2008. Mitigation of wind-induced motion of milad tower by tuned mass damper. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 18: 371–385.

Gocał J., Ortyl Ł., Sołtys M. 2006: Instrument set for georadar antenna positioning using GPS or robotized total station. Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission. Geodesy / Polish Academy of Sciences; ISSN 0079-3299; 42. — S. 5–14.

Gocał J., Ortyl Ł., Sołtys M., Wąsik P. 2007: Methodology of terminally guided georadar – tacheometer surveying kit exploitation in the process of localization of underground elements and completion of thematic maps' content. Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy, 43: 5–17.

Gołębiowski T. 2006. Numeryczne modelowanie pola georadarowego przy pomocy metody FDTD, Geoinformatica Polonica, 8: 23-36.

Grabiec M. 2017. Stan i współczesne zmiany systemów lodowcowych południowego Spitsbergenu. W świetle badań metodami radarowymi ISBN 978-83-226-3014-3, Wydawnictwo UŚ, Katowice.

Hugenschmidt J. 2002. One – to – one comparison between radar results and reality on a concrete bridge, Proceedings of the 9th International conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, 427-432

Hugenschmidt J. 2004. Accuracy and Reliability of radar results on bridge decks. Proc. 10th International Conference on Ground Penetrating Radar. Delft/ NL.

ISO 4866:2010. Mechanical vibration and shock -- Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.

Judycki J., Jaskuła P. 2010. Diagnostyka i modernizacja konstrukcji nawierzchni drogowych. Diagnostyka, monitoring i modernizacja eksploatowanych obiektów budowlanych. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, 233-252.

Kaliński W., Pillich W., Wojnarski J. 2000. Drgania wieży basztowej, wzbudzone działaniem maszyny wyciągowej. Maszyny Dźwigowo-Transportowe, 3: 40-47.

Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. 2011. Zarys metody georadarowej. Wydawnictwa AGH, Kraków.

Kuras P., Ortyl Ł. 2014. Selected Geometric Aspects of Planning and Analysis of Measurement Results of Tall Building Structures Using Interferometric Radar. Geomatics and Environmental Engineering, 8/3: 77-91.

Lazzarini T. i in. 1977. Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.

Lehmann F., Green A. G. 2000. Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing, Geophysics, 65: 836–848.

Lehmann F., Green A.G. 1999. Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions, Geophysics, 64: 719-731.

Lenda G. 2007. Determining the measurement accuracy for moving georadar using a robotized tacheometer with optional automatic target recognition. Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy, 43: 99–112.

Lenda G. 2007. Setting out center coordinates of the georadar antenna based on coordinates of GPS antenna or rangefinder prism integrated in the georadar. Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy, 43: 65–83.

M. Tischler M., Collins M.E., Grunwald S. 2002. Integration of Ground-Penetrating Radar Data, Global Positioning Systems, and Geographic Information Systems to Create Three-Dimensional Soil Models. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar

Madaj A., Wołowicki W. 2001. Budowa i utrzymanie mostów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa

Morey R. 1998. Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities, Synthesis of Highway Practice 255, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy Press

Mościcki W. J., Bania G., Ćwiklik M., Borecka A. 2014. DC resistivity studies of shallow geology in the vicinity of Vistula River flood bank in Czernichow village (near Krakow in Poland), Studia Geotechnica et Mechanica, 36: 63-70.

Mularz S. 2004. Wprowadzenie do teledetekcji. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

- Neal. A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology, principles, problems and progress, *Earth Science Reviews*, 66: 261 – 330.
- Ni Y.O., Wong K.Y., Xia Y. 2011. Health Checks through Landmark Bridges to Sky-high Structures. *Advances in Structural Engineering*, 14/1: 103-119.
- Ortyl Ł. 2007a. An evaluation of the possibility of road structure layers detection with the use of RAMAC-GPR georadar equipment. *Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy* 43: 43–64.
- Ortyl Ł. 2007b. The investigation of repeatability of georadar measurement results using radargrams. *Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy* 43: 85–97.
- Ortyl Ł. 2009. Ilościowa ocena możliwości i dokładności wyznaczania grubości warstw konstrukcji nawierzchni dróg z zastosowaniem aparatury georadarowej RAMAC/GPR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 19: 323–339.
- Ortyl Ł., Karczewski J., Mazurkiewicz E. 2017. Sprawozdanie z przeprowadzonych badań podłoża gruntowego i skalnego na poligonach testowych w ramach realizacji zadania 3 walidacja metod badawczych wykorzystywanych w rozpoznaniu podłoża gruntowego - poligon testowy 11-Z Zakrzówek, Projekt RID „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, materiał niepublikowany.
- Ortyl Ł., Owerko T. 2007. Korekta wpływu deniwelacji terenu oraz częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system GNSS lub tachymetrii TCA w procesie przestrzennej lokalizacji obiektów wykrywanych georadarem. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo*, 278: 335-352.
- Oryński S., Okoń M., Klityński W. 2016. Very Low Frequency electromagnetic induction surveys in hydrogeological investigations; case study from Poland, *Acta Geophysica*, 64: 2322-2336.
- Pasternak M. (red.) 2015. Radarowa penetracja gruntu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa.
- PIG-PIB. 2013 - Jaskinie Polskie - <http://jaskiniepolski.pgi.gov.pl/>.
- Pilecki Z., Popiołek E., Karczewski J., Ziętek J., Kłosiński J., Baranowski A., Pilecka E., Ortyl Ł., Pszonka J., Krawiec K. 2008. *Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska*. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „ART-TEKST”, Kraków.
- PN-B-03004:1988. Kominy murowane i żelbetowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-B-03204:2002. Konstrukcje stalowe - Wieże i maszty - Projektowanie i wykonanie
- PN-EN 1997-2:2007 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Badania podłoża gruntowego (oryginalna wersja językowa).
- PN-G-05500:1989. Basztowe wieże szybowe - Konstrukcje wsporcze maszyn - Pomiar i ocena drgań
- PN-S-10040:1999. Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe żelbetowe i sprężone – Wymagania i badania.
- PN-S-10050:1989. Obiekty mostowe – Konstrukcje stalowe – Wymagania i badania.
- Popiołek E., Pilecki Z. 2005. Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Radomski W. 2016. Utrzymanie i diagnostyka Mostów w aspekcie działalności rzeczoznawcy budowlanego. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 5: 94-99
- Ronghua S., Wenwen D., Chenyu P. 2010. Vibration Analysis of Multi-Rope Friction Hoist and Shaft Tower. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Changsha City.
- Rykaluk K. 2007. Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Saarenketo T., Scullion T. 2000: Road evaluation with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, 43: 119-138
- Štěpančíková P., Dohnal J., Pánek T., Łój M., Smolková V., Šilhán K. 2011. The application of electrical resistivity tomography and gravimetric survey as useful tools in an active tectonics study of the Sudetic Marginal Fault (Bohemian Massif, central Europe), *Journal of Applied Geophysics*, 74: 69-80.

- Sudyka J. 2006. Technika radarowa w drogownictwie – nowa jakość w ocenie konstrukcji nawierzchni, I Polski Kongres Drogowy, 239-248.
- Telekomunikacja Polska S.A. 1994. Instrukcja ER-01. Eksploatacja wież i masztów, Załącznik do Zarządzenia nr 31 Prezesa Zarządu TP S.A. z dn. 30.06.1994. Warszawa.
- Tomecka-Suchoń S., Marczak H. 2015 Interpretation of ground penetrating radar attributes in identifying the risk of mining subsidence. Archives of Mining Sciences, 60: 645-656.
- Topolnicki M. 2016. GeoBIM, czyli geotechnika w BIM, Przegląd Budowlany, R/ 10: 16-23.
- Tranvik P., Alpsten G. 2002. Dynamic Behaviour under Wind Loading of a 90 m Steel Chimney. Alstom Power Sweden AB. Report S-01041, Växjö.
- Wanecki P., Drwięga B. 2011. Final design, working plans and specifications for investigated bridge in Gliwice.
- Willett D. A. i Rister B. 2002. Ground Penetrating Radar pavement layer thickness evaluation, Research Report, University of Kentucky
- Yee K. S. 1966 Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Trans. Antenna. Propagation, 14: 302-307.
- Zhang J., Wu Ch., Wang Y., Ma Y., Wu Y., Mao X. 2018. The BIM-enabled geotechnical information management of a construction project, Computing, 100/1: 47-63

