



KAROL BRZEZIŃSKI

k.brzezinski@il.pw.edu.pl



MACIEJ MAŚLAKOWSKI

m.maslakowski@il.pw.edu.pl



ARTUR ZBICIAK

a.zbiciak@il.pw.edu.pl



KAZIMIERZ JÓZEFIAK

k.jozefiak@il.pw.edu.pl

Politechnika Warszawska,  
Wydział Inżynierii Lądowej

## Koncepcja procedury walidacji metod rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie

Jednym z projektów realizowanych w ramach programu Rozwój Innowacji Drogowych (RID) jest temat badawczy pod tytułem „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”. Głównym celem projektu jest opracowanie nowych wytycznych rozpoznania podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Przygotowanie wytycznych poprzedzone było wieloetapową analizą składającą się między innymi z: przeglądu obowiązujących przepisów oraz powszechnie stosowanych i nowych metod wykorzystywanych w rozpoznaniu podłoża, walidacji metod pomiarowych, optymalizacji uwzględniającej jakość i ilość badań itp. Przedmiotem niniejszej publikacji jest przedstawienie ogólnej metodyki walidacji opracowanej na potrzeby projektu badawczego. Spektrum metod objętych nowymi wytycznymi dotyczy zarówno metod geotechnicznych, geofizycznych, jak również geodezyjnych. Określenie przydatności poszczególnych metod do rozpoznania podłoża w poszczególnych etapach realizacji inwestycji uznać można za nieźle, ponieważ możliwości i charakterystyki są dobrze znane. W wielu przypadkach można posiłkować się wynikami badań archiwalnych, porównując wyniki z ich weryfikacją w niektórych punktach. Weryfikacja taka jest wymagana zgodnie z dotychczasową instrukcją [3]. Część metod można ocenić dopiero po wykonaniu dodatkowych badań na

gruntowego i skalnego. Przegląd zawiera opisy dotyczące zarówno zakresu stosowania poszczególnych metod, ograniczeń w ich stosowaniu, jak również doświadczeń krajowych w ich wykorzystaniu. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu metod dokonano analizy, mającej na celu podsumowanie informacji przydatnych pod względem walidacji. Przykładowo, znajomość dokładności danej grupy metod upraszcza skatalogowanie pod względem przydatności do danych celów, a tym samym upraszcza procedurę walidacji. Informacje o doświadczeniach krajowych w wykorzystaniu danej metody pozwalają przewidywać, czy w dokumentacjach archiwalnych można spodziewać się wyników uzyskanych z jej zastosowaniem. W związku z tym informacje o poszczególnych metodach zgromadzone pod kątem przydatności do walidacji przedstawiono w dalszej części artykułu. Pominięto opis metod niezawierających w swojej procedurze procesu pomiarów, a opierających się wyłącznie na przetwarzaniu danych (np. metody oceny stateczności, monitoring, BIM, bazy danych).

### Metody i techniki geodezyjne i teledetekcyjne

**Obrazowanie satelitarne** polega na pomiarze cech obiektów położonych na powierzchni ziemi z poziomu satelity. Metody obrazowania satelitarnego są wykorzystywane głównie do sporządzania map obszarowych w dużych skalach (1:50 000, 1:250 000), jak również w analizie fotogeologicznej, mającej na celu rozpoznanie elementów budowy geologicznej. Dokładność obu tych metod jest znana i w dość dużym stopniu zróżnicowana, ponieważ zależy od zdolności rozdzielczej satelity. Metody teledetekcji satelitarnej są stosowane w Polsce od kilkudziesięciu lat [1].

**Satelitarna interferometria radarowa** polega na analizie obrazów różnicowych (interferogramów), powstałych przez złożenie obrazów odbicia fal radiowych od powierzchni terenu, na których widoczne są zaistniałe zmiany powierzchni terenu w postaci prążków interferometrycznych. Dwie podstawowe metody przetwarzania satelitarnych danych interferometrycznych to metoda dyferencyjna – DInSAR oraz metoda permanentnych rozpraszaczy – PSInSAR. Możliwości i dokładności tych metod zostały dobrze rozpoznane. Metoda dyferencyjna umożliwia rejestrację przemieszczeń w skali decymetrowej. Metoda PSInSAR umożliwia precyzję pomiarów do 0.1 mm w ciągu roku. Maksymalne możliwe do zarejestrowania przemieszczenia wynoszą 14 mm w ciągu 35 dni. Metody interferometrii satelitarnej są stosowane w Polsce od 1999 roku [13]. Wykorzystywane są głównie do obserwacji deformacji terenu na terenach zurbanizowanych, monitoringu działalności górniczej, jak również w badaniach osuwisk. Na większości powierzchni kraju deformacje wyznaczone metodami interferometrii wynoszą od  $-1,0$  do  $-3,0$  mm/r.

poligonach testowych. Artykuł przedstawia podstawowe założenia tej wieloetapowej procedury walidacji.

### Analiza dotychczasowych wyników pod względem przydatności do walidacji metod rozpoznania podłoża

W ramach pierwszego etapu projektu dokonano przeglądu metod badawczych stosowanych w rozpoznaniu podłoża

**Fotointerpretacja** to metoda polegająca na wizualnej interpretacji obrazu panchromatycznego, wielospektralnego lub spektrostrefowego. Określenie dokładności fotointerpretacji jest utrudnione, ze względu na subiektywny charakter interpretacji obrazów. Z tego powodu metoda wykorzystywana jest w połączeniu ze stereoskopowymi pomiarami fotogrametrycznymi. W publikacjach krajowych brak jest informacji na temat zastosowania fotointerpretacji ze zdjęć lotniczych w dokumentowaniu podłoża na potrzeby budowy dróg.

**Stereoskopowe pomiary fotogrametryczne** polegają na obserwacji dwóch zdjęć równocześnie i umożliwiają przeprowadzanie pomiaru wysokości. W publikacjach krajowych brakuje informacji na temat zastosowania stereoskopowych pomiarów fotogrametrycznych z pułapu lotniczego w dokumentowaniu podłoża na potrzeby budowy dróg. Więcej informacji o dokładności pomiarów fotogrametrycznych opisano w rozdziale dotyczącym metod niskopułapowych.

**Zobrazowania hiperspektralne w zakresie fal widzialnych (visible VIS), podczerwieni bliskiej (near infrared NIR) i średniej (shortwave infrared SWIR)** to metody oparte o technologię rejestracji w wąskich przedziałach spektralnych. Tego rodzaju obrazowania określa się hiperspektralnymi.

Dzięki zastosowaniu wymienionych metod możliwe jest uzyskanie informacji o rozkładzie przestrzennym zawartości minerałów w gruntach odkrytych, wodach, typu roślinności lub zawartości w nich wybranych składników (naturalnych – np. chlorofil lub sztucznych – zanieczyszczeń). Ze względu na szeroki zakres zastosowań, a tym samym możliwych do uzyskania informacji, nie sprecyzowane zostały dane dotyczące dokładności tych metod. W publikacjach krajowych brakuje informacji dotyczących zastosowania zobrazowań hiperspektralnych w zakresie VNIR (tzn. w zakresie widzialnym i bliskim pasma podczerwieni), jak również SWIR (tzn. w paśmie podczerwieni średniej) w dokumentowaniu podłoża na potrzeby budowy dróg.

**Obrazy termalne i zobrazowania hiperspektralne w zakresie fal termalnych (thermal infrared)** stanowią zobrazowania wykonane w jednym szerokim paśmie TIR (kamery termalne) lub w wąskich pasma porównujących zakres TIR (zobrazowania hiperspektralne). Mogą być wykorzystywane w identyfikacji minerałów kwarcowych, gleb i gruntów zanieczyszczonych oraz przy identyfikacji pustek, przypowierzchniowych grot i jaskiń. Brakuje informacji o dokładności i zastosowaniach krajowych na potrzeby drogownictwa.

**Zobrazowania radarowe i lidarowe** to metody aktywne polegające na wysłaniu sygnału i jego rejestracji po odbiciu od powierzchni. W metodach radarowych wykorzystuje się mikrofały, natomiast w metodach lidarowych – fale ze spektrum widzialnego. Metody te mogą być wykorzystywane do tworzenia NMT oraz oceny wilgotności utworów powierzchniowych, jak również w kartografii strukturalnej. Dokładność pionowa NMT tworzonych z wykorzystaniem obrazów radarowych SAR waha się od 1 do 10 m. Natomiast lidar umożliwia uzyskanie NMT o dokładności rzędu centymetrów. Dokładność NMT zależy od technicznych możliwości skanera i wysokości lotu oraz od typu pokrycia terenu. Zasadnicze ograniczenie w zastosowaniu metody lidarowej stanowi pokrycie terenu gęstą roślinnością. Opis zastosowań powyższych metod można znaleźć w publikacji [15].

**Metoda elektrooporowa, Airborne electromagnetic (AEM) – Airborne Resistivity** polega na określeniu oporności podłoża na podstawie analizy indukcji pola elektromagnetycznego wywołanej przez antenę podwieszoną do kadłuba samolotu lub helikoptera. Metoda umożliwia określenie oporności do głębokości ok. 300 m. Tym samym możliwe jest wstępne określenie grubości sedimentów, lokalizacji struktur geologicznych oraz właściwości magnetycznych skał. Metoda ma jednak liczne ograniczenia i jest mało dokładna. Nie pozwala zastąpić bezpośredniego pobierania próbek do badań geotechnicznych.

**Niskopułapowe metody fotogrametryczne (UAV)** bazują na pośrednim i bezpośrednim rozwiązaniu georeferencji zdjęć wykonanych w paśmie widzialnym, przy wykorzystaniu bezałogowych statków powietrznych UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Metody są wykorzystywane do tworzenia NMT. Przewaga technologii fotogrametrycznej UAV w stosunku do zdjęć z pułapu lotniczego polega na możliwości wykonania zdjęć zapewniających odpowiednią rozdzielczość, a co za tym idzie dużą dokładność przestrzenną modelu pokrycia terenu. Uzyskiwana dokładność wynosi od kilku do kilkudziesięciu centymetrów [18]. W literaturze fachowej zawarte są opisy dotyczące porównania efektywności technik fotogrametrii UAV oraz skaningu laserowego z innymi metodami pozyskiwania danych. Metoda nie była do tej pory wykorzystywana w Polsce na szerszą skalę do rozpoznania podłoża gruntowego. Możliwości wykorzystania w drogownictwie metod z użyciem pojazdów bezałogowych, np. dronów, podaje publikacja [4].

**Skanowanie laserowe** bazuje na nieselektywnym pomiarze dużej liczby punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Wykorzystywany jest elektrooptyczny pomiar odległości bazujący najczęściej na paśmie światła widzialnego lub podczerwonego. Efektem pomiaru jest chmura punktów, która stanowi obraz pokrycia terenu. Po przetworzeniu może być wykorzystana do opracowania NMT, jeżeli nie wystąpią okoliczności ograniczające. Naziemny skaningu laserowego jest dokładniejszym rozwiązaniem w porównaniu do skaningu mobilnego i lotniczego. Metoda wykorzystywana jest również do opracowań związanych z inwentaryzacją powykonawczą dróg oraz drogowych obiektów inżynierskich [5]. Aktualnie prowadzone są krajowe prace badawcze z zakresu zastosowania technologii skaningu laserowego w przypadku obiektów infrastrukturalnych.

**Naziemna interferometria radarowa (GB-SAR)** to interferometria radarowa oraz technika SAR stosowane z powierzchni ziemi. Służą głównie do wykrywania przemieszczeń powstających na dużych obszarach, takich jak osuwiska i tereny objęte eksploatacją górnictwem. Najwyższa możliwa do uzyskania rozdzielczość wynosi 0,50-0,75 m, natomiast dokładność pomiaru przemieszczenia jest rzędu ułamków milimetra. Metoda naziemnej interferometrii radarowej była dotychczas wykorzystywana w Polsce głównie do celów badawczych.

**Wykorzystanie odbiorników GNSS** polega na wyznaczeniu współrzędnych odbiornika na podstawie analizy sygnału pochodzącego z satelitów znajdujących się na orbicie. Dokładność w systemach wspomaganym dodatkowym odbiornikiem stacjonarnym (metoda różnicowa kodowa) wynosi od ok. 30 cm do ponad 1,0 m. W metodzie statycznej fazowej, wykorzystującej pomiar fazy sygnału, możliwa jest dokładność do kilku centymetrów. Wymaga to jednak kilkugodzinnych pomiarów. W przypadku połączenia podanych dwóch

technik możliwe jest uzyskanie dokładności w zakresie od 2 do 5 mm. Wykorzystując sieć stacji permanentnych rozmieszczonych równomiernie na obszarze kraju, stosując jeden radiomodem można uzyskać szybki pomiar współrzędnych przestrzennych z dokładnością  $\pm 2\text{--}5$  cm. Metoda ta jest powszechnie wykorzystywana w kraju.

**Tachimetry elektroniczne** to jedna z najpopularniejszych technik pozycjonowania w przestrzeni 3D. Tachimetr umożliwia wyznaczanie położenia względnego (w układzie własnym instrumentu) punktów pomiarowych. Dokładność pomiaru kierunku poziomego oraz kąta pionowego wynosi nie mniej niż  $\pm 7''$ , natomiast dokładność pomiaru odległości wynosi  $\pm (3 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$  – stosując tachimetry do typowych zastosowań. Tachimetry precyzyjne mogą osiągnąć dokładność pomiaru kierunków pionowych oraz kąta zenitalnego  $\pm 0,5''$ , a dokładność pomiaru odległości nawet do 0,25 mm. Tachimetry jest obecnie podstawową metodą wykonania pomiarów sytuacyjno-wysokościowych na potrzeby opracowania map wielkoskalowych [17].

**Niwelacja geometryczna** stanowi jeden z podstawowych sposobów wyznaczania wysokości. Polega na ustaleniu w terenie płaszczyzny poziomej za pomocą niwelatorów, a następnie wyznaczenie odległości pionowych od punktów terenowych. Błąd odczytu w przypadku niwelacji technicznej wynosi około  $\pm 1$  mm, natomiast w przypadku niwelacji precyzyjnej dokładność ta zwiększa się nawet do  $\pm 0,05$  mm. Metoda jest szeroko wykorzystywana do wyznaczania wysokości szczegółów sytuacyjnych.

## Metody geofizyczne

**Metody sejsmiczne** polegają na pomiarze prędkości rozchodzenia fali sejsmicznej w ośrodku gruntowym. Na tej podstawie określone są sprężyste właściwości ośrodka. Ponadto, w metodach tych wykorzystuje się zjawiska ugięcia fal sejsmicznych w ośrodku gruntowym, odbicia fal od granic o różnych parametrach mechanicznych, pomiary z wykorzystaniem fal bezpośrednich oraz zjawiska związane z przemieszczaniem się fal powierzchniowych.

Techniki wykorzystujące fale refrakcyjne bazują na zjawisku refrakcji fali na granicach ośrodka o różnych parametrach mechanicznych. Wyniki po zinterpretowaniu pozwalają na wyznaczenie rzeczywistej prędkości fali i położenie granic ośrodka o różnych właściwościach sprężystych.

Techniki wykorzystujące fale powierzchniowe opierają się na zależności prędkości poprzecznych fal powierzchniowych od ich częstotliwości. Metoda służy do wykrywania gruntów o obniżonych parametrach mechanicznych, stref rozluźnionych i upłynnień gruntu.

Techniki wykorzystujące fale bezpośrednie, takie jak prześwietlenie międzyotworowe, wykorzystują pomiar prędkości fal, zarówno poprzecznych, jak i podłużnych w warstwie podłoża pomiędzy dwoma punktami w głębi ziemi. Umożliwiają określenie uśrednionej wartości pola prędkości na danej wysokości (w danej warstwie), a zatem zakładają jednorodny rozkład właściwości mechanicznych.

Techniki wykorzystujące fale odbite, takie jak sejsmika refrakcyjna, pozwalają na dobre określenie geometrii zalegania warstw lub innych horyzontów odbijających. Są mało precyzyjne w określaniu pola prędkości w podłożu.

W Polsce, badania sejsmiczne do celów budowy dróg są wykonywane sporadycznie [2, 10].

**Metody elektrooporowe** o potencjalnym zastosowaniu w budownictwie drogowym to przede wszystkim 1D sondowania elektrooporowe (SE, VES) i 2D/3D tomografia elektrooporowa (ERT, RI).

Sondowania elektrooporowe polegają na wyznaczeniu jednowymiarowego modelu zmian oporności elektrycznej ośrodka geologicznego wraz z głębokością. Uzyskany model podaje sekwencję płasko-równoległych warstw o wyznaczonych parametrach geoelektrycznych: opornościach i miąższościach. Miarą dokładności inwersji jest błąd dopasowania teoretycznej krzywej sondowania, obliczonej w przypadku wyinterpretowanego modelu, co nie przekłada się wprost na dokładność wyznaczenia litologii. Zatem, takie określenie dokładności w kontekście procedury walidacyjnej nie daje pełnej informacji.

Tomografia elektrooporowa umożliwia rozpoznawanie 2D/3D budowy geoelektrycznej ośrodka. Metoda polega na wykorzystaniu wyników z kilkudziesięciu elektrod rozstawionych na prostoliniowym profilu z w równych odstępach. Pionowa rozdzielczość metody maleje wykładniczo z głębokością. Miarą poprawności takiego modelu jest błąd średniokwadratowy dopasowania POP (pseudo-Przekrój Oporności Pozornej) teoretycznego do POP polowego. Podobnie jednak, jak w przypadku sondowania elektrooporowego takie określenie dokładności w kontekście procedury walidacyjnej nie daje pełnej informacji.

Penetracyjne Profilowanie Oporności polega na określaniu właściwości ośrodka przy pomocy sond wciskanych lub wbijanych w luźne utwory geologiczne. Jest to badanie inwazyjne, jednak jego rozdzielczość jest znacznie większa niż w przypadku metod powierzchniowych.

Ogólnie należy stwierdzić, że dokładność i wiarygodność metod elektrooporowych jest w dużym stopniu uzależniona od występowania odpowiedniego kontrastu oporności między różnymi utworami geologicznymi.

Zastosowanie metod elektrooporowych w Polsce do rozwiązywania zagadnień inżynierskich opisane jest w szeregu publikacji, np. [7, 11].

**Metody elektromagnetyczne** polegają na pomiarze zmiennego pola magnetycznego sztucznie wyindukowanego w ośrodku skalnym. Na podstawie zmian fazy pola indukowanego w stosunku do pola indukującego (technika konduktometryczna) względnie na podstawie pomiaru zaniku pola wtórnego (technika procesów przejściowych) sporządza się profil oporności. W Polsce dotychczas nie stosowano techniki procesów przejściowych, natomiast technikę konduktometryczną wykorzystywano w specyficznych zagadnieniach (np. stopnia zanieczyszczenia gruntu).

**Metody magnetyczne** mogą znaleźć potencjalne zastosowanie w budownictwie do wykrywania głęboko zakopanych lub zatopionych niewybuchów, wykrywania przewodów (rur), przepustów oraz jako wstępna metoda rozpoznania obecności warstw kulturowych (wspomaganie badań archeologicznych). W Polsce technikę magnetyczną powszechnie stosuje się w pracach archeologicznych przy określaniu położenia i zasięgu siedlisk ludzkich.

**Metody grawimetryczne** polegają na analizie zależności natężenia pola grawitacyjnego od zmian w rozkładzie mas



w podłożu. W rozpoznaniu podłoża gruntowego metodą grawimetryczną wykorzystuje się głównie w celu wyznaczenia stref anomalnych związanych z występowaniem pustek. W Polsce metoda mikrogravimetryczna jest stosowana do szacowania zasięgu szkód górniczych. Stosowanie tej metody jest wymagane przy projektowaniu inwestycji w rejonach występowania szkód górniczych, głównie na obszarze Górnego Śląska.

**Metoda georadarowa** polega na pomiarze fali odbitej na granicy dwóch ośrodków różniących się względną przenikalnością elektryczną. Służy ona przede wszystkim do wyznaczenia litologii. Dokładność metody zależy od bardzo wielu czynników, takich jak parametry anten, skuteczna powierzchnia odbicia, przewodność ośrodka itp. W Polsce, metodą georadarową wykorzystuje się do rozpoznania konstrukcji nawierzchni drogowych [9, 19], jak również przy rozwiązywaniu szeregu zagadnień geologicznych.

### **Techniki wiertnicze oraz metody poboru próbek gruntów i skał**

W przypadku technik wiertniczych i metod poboru próbek gruntów i skał należy skupić się na dwóch głównych aspektach dotyczących dokładności. Jednym z aspektów jest dokładność określenia litologii, drugim natomiast jakość pobieranych próbek. Jakość możliwych do uzyskania próbek w zależności od przyjętej techniki została odpowiednio rozpoznana i opisana w normie PN-EN ISO 22475-1:2006 [14]. Do niedawna dominującym rodzajem wierceń w Polsce w zakresie inwestycji drogowych były wiercenia świdrem spiralnym, do którego na pewnych odcinkach przymocowywano cienkościenny próbnik typu Shelby, w celu pobrania próbki o nienaruszonej strukturze. W okresie ostatnich lat, głównie po 2012 r., nastąpił wzrost stosowalności bardziej zaawansowanych technik wiertniczych.

### **Laboratoryjne i terenowe metody badań właściwości podłoża gruntowego i skalnego do celów drogownictwa**

Metody laboratoryjne i terenowe badań właściwości podłoża gruntowego i skalnego stanowią obszerną grupę technik badawczych. Zasadniczym celem jest określenie rodzaju gruntów znajdujących się w podłożu, ich stanu oraz parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych. W większości są to metody powszechnie już stosowane w Polsce, bądź zalecane/dopuszczane przez normy.

Podsumowując, przedstawione zestawienie metod badawczych stosowanych, względnie możliwych do zastosowania metod w rozpoznaniu podłoża gruntowego na potrzeby inwestycji drogowych ilustruje przekrój potencjalnych problemów związanych z ich walidacją.

Po pierwsze, zakres możliwych do uzyskania informacji jest bardzo obszerny. Ogólna procedura walidacji powinna być uniwersalna i jedynie w szczegółach dostosowywana do danych grup metod. Walidacja wymaga zweryfikowania wyników badania, zatem dane uzyskane jedną metodą (metoda walidowana) muszą być porównane z wynikami drugiej, pewniejszej metody (metoda odniesienia). Wiele z opisanych metod

daje praktycznie tylko informację jakościową. W takiej sytuacji wnioskowanie, które pozwoliłoby na uszeregowanie metod pod względem przydatności, może być utrudnione lub wręcz niemożliwe. Niektóre techniki pomiarowe generują ponadto wyniki tak unikalne, że nie da się ich porównać z wynikami innej metody, względnie porównanie takie nie wniosłoby nic do ich oceny pod względem przydatności w badaniach podłoża.

Należy podkreślić fakt dużego zróżnicowania w rozpoznaniu dokładności poszczególnych metod. Niektóre metody, w szczególności wiele metod geodezyjnych, jest bardzo dobrze rozpoznanych i przeprowadzenie dodatkowych badań nie wniosłoby istotnych informacji pozwalających na ich uszeregowanie pod względem przydatności. Walidacja danej metody, rozumiana jako ocena przydatności do określonych celów, może być zatem wykonana na podstawie powszechnie dostępnych wyników badań i danych literaturowych, względnie na podstawie dokumentacji archiwalnych.

Dokładność metod zależna jest zwykle od wielu czynników. Z tego powodu przewiduje się, że w niektórych przypadkach procedura walidacji może być rozszerzona o analizę wpływu poszczególnych czynników na uzyskiwane wyniki.

## **Założenia ogólne procedury walidacyjnej**

Celem walidacji jest określenie przydatności metod badawczych wykorzystywanych w rozpoznaniu podłoża gruntowego. W publikacji przedstawiono różne podejścia, umożliwiające ocenę metod badawczych w zależności od stopnia ich dotychczasowego rozpoznania w literaturze technicznej oraz w praktyce wykonawczej.

Przyjęte definicje:

**Metoda walidowana** – metoda, której przydatność do określonych celów jest określana w procedurze walidacji.

**Metoda odniesienia** – metoda rozstrzygająca w badaniach określonej wielkości (np. parametru gruntu). Zwykle jest to metoda, na którą powołuje się definicja parametru.

W omawianym projekcie analizowane były różne metody badawcze, zarówno dobrze rozpoznane i powszechnie stosowane, jak również metody nowe. W zależności od stopnia dotychczasowego rozpoznania metody przewiduje się, że będzie można dokonać jej walidacji w oparciu o różne źródła danych:

- na podstawie danych literaturowych,
- na podstawie danych archiwalnych – walidacja oparta o porównanie uzyskiwanych wartości parametrów (podejście ilościowe),
- na podstawie wyników badań z poligonów testowych
  - walidacja oparta o porównanie uzyskiwanych wartości parametrów (podejście ilościowe),
  - walidacja dotycząca oceny wpływu niektórych różnic w metodyce pomiarowej na uzyskiwane wyniki (podejście problemowe).

## **Walidacja na podstawie danych literaturowych**

Przedmiotem walidacji są metody o bardzo szerokim zakresie stosowania. Roboczo można podzielić je ze względu na zakres uzyskiwanych danych:

- współrzędne przestrzenne punktów i ich przemieszczenia – metody geodezyjne,
- parametry geotechniczne gruntu i litologia na podstawie odwiertów – metody geotechniczne,
- litologia i inne parametry fizyczne – metody geofizyczne.

Dokładność i wiarygodność niektórych metod jest dobrze rozpoznana i określenie przydatności do badania podłoża na poszczególnych etapach realizacji inwestycji nie powinno stanowić problemu. Dotyczy to przede wszystkim grupy metod geodezyjnych. Dane do przeprowadzenia walidacji w podany sposób można uzyskać z literaturowych opisów kampanii pomiarowych itp. Przykładem może być publikacja [15], w której przeanalizowano możliwości fotogrametrii i lotniczego skaningu laserowego, aby odpowiedzieć na pytanie, czy mogą zostać wykorzystane do opracowania mapy do celów projektowych. Badania przeprowadzono wzdłuż istniejącej budowli komunikacyjnej (odcinek linii kolejowej). Wyniki pomiaru fotogrametrycznego zwalidowano w odniesieniu do pomiaru z lotniczego skaningu laserowego, w przypadku którego metodą odniesienia była niwelacja precyzyjna. Na tej podstawie określono błąd średni, odchylenie standardowe i średnią różnicę pomiędzy modelami NMT uzyskanymi różnymi metodami. Znając tego typu charakterystyki opisujące metody, można dokonać porównania z wymaganiami stawianymi metodom geodezyjnym stosowanym do różnych celów związanych z rozpoznaniem podłoża na potrzeby budownictwa drogowego. Na tej podstawie można określić ich przydatność, co jest przedmiotem walidacji.

## Walidacja na podstawie danych archiwalnych

Kolejnym źródłem danych do przeprowadzenia walidacji mogą być dokumentacje archiwalne. W stosunku do walidacji na podstawie danych literaturowych procedura jest bardziej złożona, gdyż wymaga zebrania wyników z różnych źródeł, a także przeanalizowania dużej liczby danych, w celu uzyskania interesujących charakterystyk metody. Natomiast w stosunku do walidacji na podstawie badań z poligonów testowych jest mniej pracochłonna, gdyż wykorzystuje pomiary, które już zostały wykonane.

### Opis procedury walidacji

W przypadku, gdy walidacja zostanie przeprowadzona na podstawie wyników badań uzyskanych z dokumentacji archiwalnych, to pod uwagę należy brać pary wyników uzyskane dwiema metodami (metoda odniesienia – metoda walidowana) w tych samych lokalizacjach. Nie jest możliwe pozyskanie wyników dokładnie tego samego materiału metodą odniesienia i metodą kalibrowaną, zatem próbka gruntu badana jedną metodą nie jest tożsama z próbką gruntu badaną drugą metodą. Na zmienność wyników składa się zatem zmienność ośrodka gruntowego, czego nie można oddzielić od zmienności metody.

Specyfika danych uzyskanych na podstawie dokumentacji archiwalnych umożliwia pozyskanie jedynie jednej pary wyników w danej lokalizacji. Stąd też nie jest możliwe oddzielenie czynników wpływających na zmienność metody, określenie precyzji ani powtarzalności.

W związku z powyższym, jako miarę przydatności metody przyjęto parametry rozbieżności wyników uzyskanych metodą odniesienia i metodą walidowaną (na przykład  $R = (IL_{LAB} - IL_{CPT})$ ):

- Średnia rozbieżność  $\mu R$ ,
- Odchylenie standardowe rozbieżności  $\sigma R$ .

Podstawowe elementy wchodzące w skład procedury walidacji to:

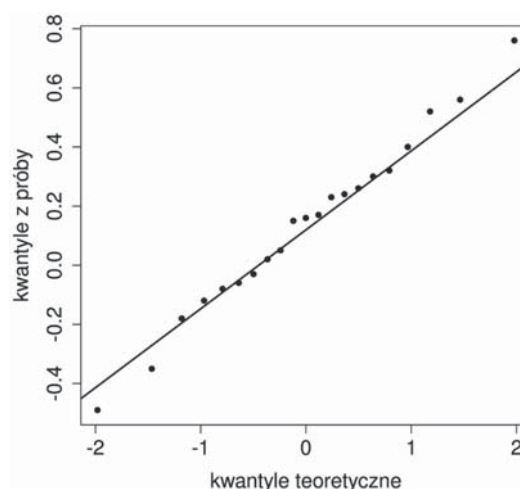
1. Sprawdzenie czy uzyskana rozbieżność (różnica) w wartościach parametrów gruntowych jest zgodna z rozkładem normalnym. Zostanie to wykonane przy pomocy testu Shapiro-Wilka [16] oraz wykresów kwantylowych.
2. Pogrupowanie, o ile to możliwe, wyników z uwzględnieniem głównych czynników (rodzaj gruntu, poziom badanego parametru gruntu) i przeanalizowanie ich wpływu przy pomocy analizy wariancji ANOVA.
3. Przeprowadzenie testu t-Studenta dla par wiązanych, w celu określenia statystycznej istotności otrzymanych rozbieżności (różnic) oraz wyznaczenie przedziałów ufności [8, 6].
4. Analiza wyników i określenie mocy przeprowadzonych testów.

### Kryteria oceny

Opisane postępowanie umożliwia wzajemne porównanie metod. W celu określenia przydatności do danych celów konieczne jest zdefiniowanie odpowiednich kryteriów, które pozwolą ocenić czy dana metoda nadaje się do zastosowania w poszczególnych etapach przygotowania inwestycji, na przykład na etapie STEŚ albo koncepcji programowej. Kryteria mogą być subiektywne. Powinny być oparte o wiedzę ekspertów z danych technik pomiarowych, projektantów względnie innych osób, które te wyniki wykorzystują. Ustalenie takich kryteriów może być wspomagane analizami optymalizacyjnymi.

### Wykorzystywane narzędzia statystyczne

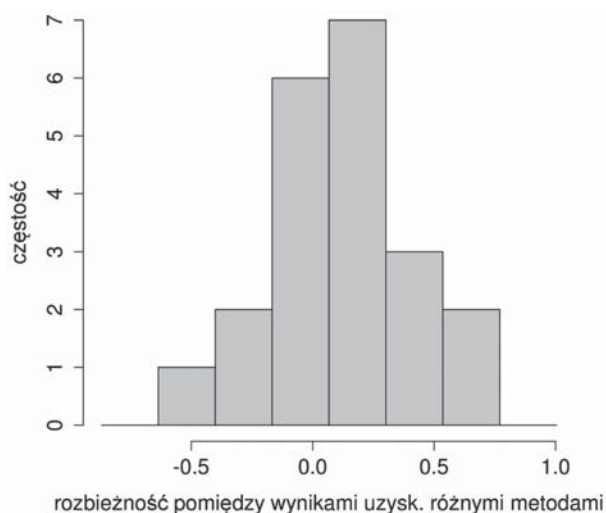
W sytuacji bazowania na uzyskanych wynikach pomiarów, wnioskowanie powinno być dokonane na podstawie odpo-



Rys. 1. Przykładowy wykres kwantylowy uzyskanych rozbieżności

wiednich analiz statystycznych. Analizy powinny składać się z dwóch etapów. Pierwszy etap to analiza danych pod względem poprawności, wykrycie grubych błędów, wykrycie obserwacji odstających, analiza podstawowych własności rozkładu. Najpowszechniejszy w przyrodzie jest rozkład normalny. Oceniający często przyjmują a-priori, że wyniki mają taki rozkład, ale powinno to zostać sprawdzone. Służą do tego testy statystyczne, jak na przykład analiza wykresu kwantylowego (rys. 1), test Shapiro-Wilka i inne.

W dalszej kolejności ocena poszczególnych metod pomiarowych musi zostać dokonana na podstawie porównania wyników uzyskanych metodą odniesienia i metodą walidowaną. W tym celu są stosowane odpowiednio dobrane testy statystyczne jak: *paired t-test*, czy analiza ANOVA oraz estymacja przedziałowa.



Rys. 2. Przykładowy histogram częstości uzyskanych rozbieżności

## Walidacja na podstawie danych wyników badań z poligonów testowych

### Walidacja na podstawie porównania uzyskiwanych wartości parametrów – podejście ilościowe

W zależności od ilości uzyskanych wyników badań występują dwie możliwości przeprowadzenia walidacji w sposób ilościowy.

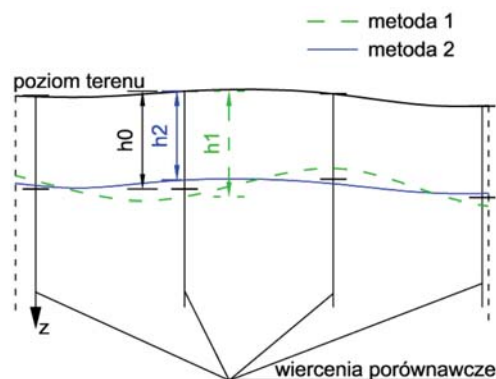
Pierwszy sposób jest analogiczny do procedury opisanej w poprzednim rozdziale publikacji. Zostanie on wykorzystany, jeżeli w danej lokalizacji badania będą wykonywane bez powtórzeń. Wówczas walidacja będzie opierała się o analizę bezwzględnej różnicy w parach wyników z wykorzystaniem *paired t-test*.

Jeżeli natomiast w określonych lokalizacjach badania będą wykonywane z odpowiednią liczbą powtórzeń, to możliwe będzie przeprowadzenie dodatkowo analizy ANOVA. Może to umożliwić określenie istotności wpływu poszczególnych czynników charakterystycznych dla danej lokalizacji (np. spoistość gruntu) na uzyskiwane daną metodą wyniki.

## Walidacja dotycząca oceny wpływu niektórych różnic w metodyce pomiarowej na uzyskiwane wyniki

Opisane uprzednio procedury walidacji polegają na analizie ostatecznych wyników uzyskiwanych poszczególnymi metodami. Walidowane metody należą zwykle do grupy metod wskaźnikowych, tzn. takich, w których o wartości określonego parametru wnioskuje się pośrednio na podstawie pomiaru innych wielkości. Dlatego wpływ na uzyskiwane wyniki ma przyjęta metodyka (krok pomiaru, przyjęta funkcja korelacyjna itp.). Wpływ niektórych różnic w metodyce pomiarowej na uzyskiwane wyniki może być przedmiotem dodatkowej analizy. W celu określenia zapotrzebowania na rozwiązanie tego typu problemów, występujących w różnych grupach metod, konieczne było przeprowadzenie ankiety, której wyniki zostaną wykorzystane do projektowania kolejnych etapów badań.

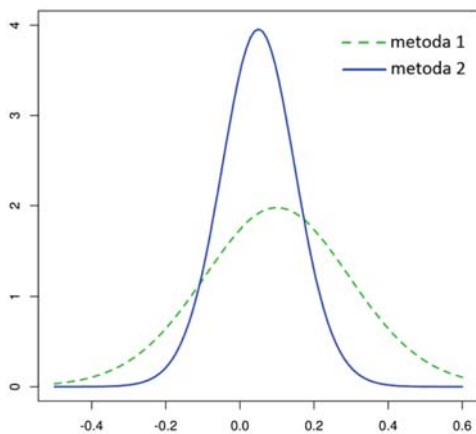
Uwzględnienie wpływu niektórych różnic w metodyce pomiarowej na uzyskiwane wyniki może być przeprowadzone w sposób analogiczny do wcześniej opisanych procedur. W takim przypadku wyniki badania wykonane daną metodą, natomiast różniące się niektórymi elementami, mogą być traktowane jak dwie odrębne metody. Na przykład, wykonując profil geologiczny na podstawie tomografii elektrooporowej można zastosować różny krok pomiarowy, układ geometryczny itd. Dzięki interpretacji wyników uzyskuje się rozbieżności pomiędzy metodami oraz pomiędzy wynikami walidowanych metod i metody odniesienia (np. odwiert), co przedstawiono na rysunku 3. Prezentuje on schematycznie fragment profilu geologicznego, w którym granica warstw jest wyznaczona na podstawie tomografii elektrooporowej z zastosowaniem zróżnicowanej metodyki pomiarowej (metoda 1 i metoda 2). Głębokość położenia warstwy jest zweryfikowana punktowo poprzez odwiert.



Rys. 3. Schemat profilu geologicznego otrzymanego na podstawie tomografii elektrooporowej z zastosowaniem zróżnicowanej metodyki pomiarowej (metoda 1 i metoda 2)

Uzyskane rozbieżności można przybliżyć rozkładem Studenta (przybliżenie rozkładu normalnego, zależne od liczby pomiarów) oraz zilustrować na wykresie gęstości prawdopodobieństwa. Przykładowy wykres przedstawiono na rysunku 4.





Rys. 4. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa rozkładów różnic w położeniu granicy warstwy wyznaczonej dwiema metodami w stosunku do granicy wyznaczonej z odwiertu (metody odniesienia). Różnica wyznaczona w metrach

Formalne wnioskowanie w procedurach walidacji będzie opierało się przede wszystkim o testy statystyczne i estymację przedziałową, natomiast tego typu wykresy pozwalają na przeprowadzenie wstępnej analizy oraz wykrycie błędów. Na podstawie danych przedstawionych na wykresie (rys. 4) można wnioskować bezpośrednio (wprost z rozkładu [12]), że metoda 2 jest dokładniejsza niż metoda 1. Maksimum bliższe „0” oznacza, że różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi daną metodą i metodą odniesienia są mniejsze. Ponadto, wykres bardziej spłaszczony oznacza większy rozrzut wyników, co niekorzystnie wpływa na niepewność pomiarów, zatem pod tym względem metoda 2 również jest lepsza. Dalsza analiza może wykazać czy prezentowane na wykresie różnice są istotne ze statystycznego punktu widzenia.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wstępne możliwości przeprowadzenia walidacji w ramach projektu badawczego „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”. Przeprowadzenie walidacji można dokonywać w zależności od dostępnych informacji, na podstawie danych literaturowych, danych archiwalnych lub badań na poligonach testowych. Skatalogowanie metod badawczych pod względem przydatności stosowania w budownictwie drogowym będzie wymagało rozbudowania przyjętej metodyki o kryteria na podstawie wiedzy eksperckiej.

Przedstawiona procedura będzie uszczegółowiana i modyfikowana w kolejnym etapie realizacji projektu, tak aby możliwie najlepiej wykorzystać zgromadzone dane.

Artykuł został opracowany z wykorzystaniem informacji zawartych w raporcie z realizacji tematu badawczego pod tytułem „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, przygotowanego przez konsorcjum w składzie: Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Politechnika Warszawska.

Projekt sfinansowany został przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad – w ramach wspólnego przedsięwzięcia RID.

## Bibliografia

- [1] Bażyński J., Frankowski Z., Graniczny M., 1974, Wytyczne dokumentowania geologiczno – inżynierskiego dla obiektów liniowych, Wydawnictwa Geologiczne.
- [2] Bestyński Z., Thiel K., 2007, Badania geofizyczne w rozpoznaniu warunków geotechnicznych budowy tuneli. *Górnictwo i Geoinżynieria* 31(3): 37-43.
- [3] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych, Część 1 i 2. GDDP, Warszawa, 1998
- [4] Jabłoński K., 2014, Zastosowanie UAV w drogownictwie. *Magazyn Autostrady*, nr 8-9 2014.
- [5] Kędziński, M., Walczykowski, P., & Frykowska, A., 2008, Naziemny skaning laserowy drogowych obiektów inżynierskich. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18.
- [6] Luszniwicz A., 1986, Metody wnioskowania statystycznego, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1986
- [7] Maślakowski M., Kowalczyk S., Mieszkowski R., Józefiak K., 2014, Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) as a tool in geotechnical investigation of the substrate of highway. *Studia Quaternaria*, 31(2): 83–89.
- [8] Mazerski J., 2009, Statystyczna analiza wyników doświadczalnych, Wydawnictwo MALAMUT, Warszawa 2009
- [9] 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*, vol. 19, s. 323-339.
- [10] Ostrowski S., Rybak-Ostrowska B., Lasocki M., 2013, Wykorzystanie przypowierzchniowych badań geofizycznych w rozpoznaniu budowy geologicznej na przykładzie stref osuwiskowych w Karpatach. *Przegląd Geologiczny* 61(1): 67-73.
- [11] Pacanowski, G., Sokołowska, M., Mieszkowski, R., 2016, Rola obrazowania elektrooporowego w uszczegółowieniu skomplikowanej budowy geologicznej wzgórze Morasko w Poznaniu, *Przegląd Geologiczny*, 64(4), 238-244.
- [12] Pajzderski, P., & Iglantowicz, T., 2000, Dokładność metody pomiarowej a niepewność pomiaru-próba analizy. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 46, 14-16.
- [13] Perski Z., 1999, Osiedlenie terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geologiczny*, 47(2), 171-174.
- [14] PN-EN ISO 22475-1:2006 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Pobieranie próbek metodą wiercenia i odkrywek oraz pomiary wód gruntowych - Część 1: Techniczne zasady wykonania (wersja angielska).
- [15] Pyka, K., Rzepka, A., & Słota, M., 2012, Porównanie fotogrametrii i lotniczego skaningu laserowego jako źródeł danych do opracowania NMT dla celów projektowych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 24.
- [16] Royston P., Remark AS R94, 1995, A remark on Algorithm AS 181: The W test for normality. *Applied Statistics*, 44, 547–551.
- [17] Rozporządzenie w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego. *Dz.U.* 2011 nr 263 poz. 1572.
- [18] Siebert S., Teizer J., 2014, Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction* 41 (2014) 1–14.
- [19] Sudyka J., Mechowski T., Harasim P., 2009, Nowoczesne metody oceny stanu nawierzchni w utrzymaniu sieci drogowej, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym, Poznań 3-4 września 2009