

dr Tomasz Szczepański  
Wydział Geologii UW  
Al. Żwirki i Wigury 93  
02-089 Warszawa  
[t.szczepa@uw.edu.pl](mailto:t.szczepa@uw.edu.pl)  
tel. 603296102

Załącznik 2a  
do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego z dnia 27.02.2019

AUTOREFERAT  
Przedstawiający główne osiągnięcie naukowe:  
**„Metodyka interpretacji polowych i laboratoryjnych badań sztywności gruntów  
w ocenach geologiczno inżynierskich”**  
a także omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

### 1. Imię i Nazwisko.

**Tomasz Szczepański**

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe.

- **Tytuł magistra, kierunek geologia, w zakresie geologii inżynierskiej (r. 2000)**  
Praca magisterska wykonana na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego  
pod kierunkiem prof. dr hab. Ryszarda Kaczyńskiego.  
Tytuł pracy: *"Wytrzymałość i przewodność hydrauliczna ilów plioceńskich na poletku  
reperowym Warszawa - Stęgny (rejon południowy)"*
- **Stopień doktora nauk o Ziemi w zakresie geologii ( I.2006 r.)**  
Rozprawa doktorska przygotowana i obroniona z wyróżnieniem na Wydziale Geologii  
Uniwersytetu Warszawskiego.  
Promotor prof. dr hab. Ryszard Kaczyński.  
Tytuł rozprawy: *„Ocena stanu skonsolidowania wybranych ilów na podstawie analizy  
parametrów ściśliwości”*

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- **XII.2000- XI.2005 - doktorant** w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej  
Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

- 02.2006-09.2006 - **specjalista w zawodzie** w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.
- 10.2006 – 09.2016 – **adiunkt** w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.
- 10.2016 – rec. – **starszy wykładowca** w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

4. Wskazanie 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego,

Jako osiągnięcie naukowe przedstawiono cykl siedmiu publikacji pod zbiorczym tytułem:

**Metodyka interpretacji polowych i laboratoryjnych badań sztywności gruntów w ocenach geologiczno inżynierskich**

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

OPRACOWANIE MONOGRAFICZNE

1. Godlewski T., Szczepański T., 2015, *Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych: Poradnik, Seria: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki ITB 494/2015, Warszawa:Instytut Techniki Budowlanej, 81 stron, ISBN 978-83-249-8195-3,*

ARTYKUŁY

2. Barański M., Godlewski T., Szczepański T. – „Determination of soil stiffness parameters on chosen test sites, using in situ seismic methods”, *Soil parameters from in situ and laboratory tests. Poznań, 27-29.IX.2010r, Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, s. 149-157, ISBN 978-83-7160-592-5*
3. Godlewski T., Szczepański T. – „Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu ( $G_o$ ) – metody oznaczania i przykłady zastosowań” – *Kwartalnik AGH, Kraków 2011, R.35,*

4. Godlewski, T., Szczepański T. – “Determination of soil stiffness parameters using in-situ seismic methods insight in repeatability and methodological aspects”, *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, Coutinho&Mayne (eds), 2013, CRS Press Taylor & Francis Group, London, vol.1, s. 441-446, ISBN 978-0-415-62136-6
5. Godlewski T., Szczepański T. – „Measurement of soil shear wave velocity using in situ and laboratory seismic methods – some methodological aspects”, *Geological Quarterly* 2015, Vol. 59, no 2, p. 358-366. DOI: 10.7306/gq.1182, ISSN 1641-7291
6. Godlewski T., Szczepański T., Bogusz W. – „Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności ( $G_0$ ) gruntów w praktyce geotechnicznej”, *Inżynieria Morska i Geotechnika*. 2015, R.36, nr 3, s. 371-376. ISSN 0867-4299
7. Tomasz SZCZEPAŃSKI, Tomasz GODLEWSKI, 2017, Wybrane aspekty prawidłowego doboru parametrów badania i weryfikacji wyników oznaczeń dla określania modułu sztywności ( $G_0$ ) w metodzie BET, *Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences* (2017), 26 (1), 75–84, ISSN 1732-9353

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

CEL NAUKOWY

Przedmiotem prezentowanych prac badawczych jest rozwijanie oraz testowanie nowych aspektów określania właściwości mechanicznych ośrodka gruntowego przy zastosowaniu wybranych metod sejsmiki powierzchniowej oraz pomiarów laboratoryjnych. Od roku 2005 wykorzystuję i rozwijam polowe badania metodami sejsmiki powierzchniowej, oraz laboratoryjne pomiary prędkości fal sejsmicznych w gruncie, na potrzeby określania charakterystyki tzw. „sztywności gruntów”. W analizach zachowań gruntów stosuje się ten termin, rozpatrując zakresy małych odkształceń (pseudo sprężystych), wynikających z występowania w ośrodku gruntowym naprężeń stycznych. Stosowaną tu miarą jest moduł ścinania  $G_{max}$ , nazywany też modułem sztywności. Dzięki zależnościom wynikającym z teorii sprężystości, wyznaczanie wartości  $G_{max}$  możliwe jest na podstawie pomiarów prędkości fali poprzecznej w gruncie o znanej gęstości objętościowej. ( $G_{max}=\rho V_s^2$ ).

Znaczenie wyznaczania miarodajnych wartości parametrów związanych ze sztywnością gruntu (jak  $G_{max}$  czy  $E_{max}$ ) w zakresie małych odkształceń jest niekwestionowane i wynika z potrzeby ich wykorzystywania w zaawansowanych narzędziach obliczeniowych. Wiąże się to rozwijaniem obliczeniowych metod modelowania zachowań ośrodka

gruntowego, a także dążnością do ekonomicznego projektowania. Generalnie można stwierdzić, że we współczesnym warsztacie projektanta paleta dostępnego oprogramowania wyprzedza w pewnym sensie możliwości wprowadzania do obliczeń prawidłowo i adekwatnie określonych nowoczesnych charakterystyk parametrów podłoża geologicznego.

Dzieje się tak m.in. dlatego, że rozwój metod badawczych w geologii inżynierskiej i geotechnice, wymaga długotrwałego procesu wdrożeniowego i walidacyjnego w nawiązaniu do doświadczeń terenowych. Wynika to z natury ośrodka gruntowego: niehomogenicznego, anizotropowego, oraz zdywersyfikowanego pod kątem składu granulometrycznego i mineralnego, oraz dodatkowo poddanego wpływowi procesów syn- i post-sedymentacyjnych. Jako geolodzy inżynierscy zdajemy sobie sprawę z wagi tych uwarunkowań i odpowiedzialności w zakresie dostarczania miarodajnych charakterystyk mechanicznych gruntów. Rozszerzającemu, współczesnemu ujęciu tych właściwości poświęcony był zatem omawiany program badawczy.

Powyższe uwagi mają pomóc w wyjaśnieniu zakresu terminu „metodyka interpretacji badań gruntów w geologii inżynierskiej” zawartego w tytule prezentowanego osiągnięcia naukowego. Odnosi się on przede wszystkim do procesu tworzenia adekwatnych dla materiału gruntowego oraz celu badań procedur i algorytmów badawczych.

Tak więc pierwszym celem naukowym było **określenie, zbadanie, zwalidowanie** istotnych aspektów, które **powinny być brane pod uwagę i normalizowane**, w badaniach sejsmicznych polowych typu SASW i CSWS, oraz laboratoryjnych BET. Poszczególne analizowane zagadnienia są opisane w podrozdziale: *Opis rezultatów osiągnięcia badawczego*.

Warto zaznaczyć, że pomimo upływu niekiedy kilkudziesięciu lat od ich wprowadzenia wciąż niesprecyzowane są optymalne wymagania w stosowaniu niestandardyzowanej aparatury, co stanowi interesujące wyzwanie badawcze. Wybór powyższych metod był podyktowany ich dużym przyszłościowym potencjałem w zakresie uzyskiwania wieloparametrycznych charakterystyk sprężystości w warunkach złożonego ośrodka jakim jest grunt.

**Drugim celem** było określenie dla wybranych utworów geologicznych o różnej genezie charakterystycznych wartości parametrów sztywności. Stanowi to w zamierzeniu wkład w rozszerzenie wiedzy o parametrach geologiczno-inżynierskich.

Tak postawione cele mają z definicji aplikacyjny charakter a ich efekty z założenia mają mieć przełożenie na praktykę.

## WYNIKI PROGRAMU BADAWCZEGO ORAZ WYBRANE ASPEKTY ICH WYKORZYSTANIA

### Wstęp

Do pomiarów prędkości fal sejsmicznych wykorzystuje się różne metody badań polowych jak i laboratoryjnych (fig.1). Każda z metod z uwagi na specyfikę swoich walorów, ograniczeń i zastosowań daje jednak odrębny wkład w możliwości weryfikacji i uzupełniania charakterystyk fizycznych ośrodka. Stąd od początku w mojej pracy wiodącym motywem była idea wzajemnej walidacji i weryfikacji wyników w odniesieniu do stosowanych różnorodnych metod pomiarowo – interpretacyjnych.

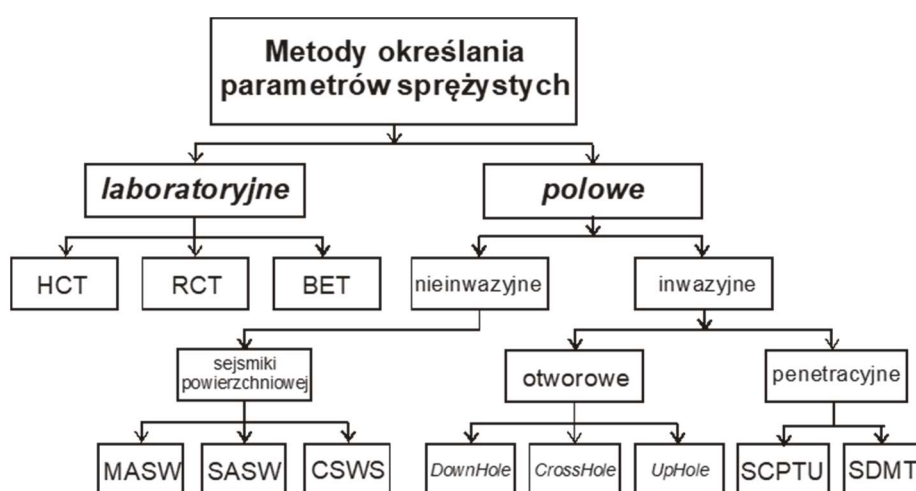


Fig. 1 Podział metod wyznaczania parametrów sprężystych gruntu [Artykuł\_I\_B\_1]

Metody *in-situ* (badania polowe) wykorzystywane w moich pracach to: SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) – analiza spektralna fal powierzchniowych, oraz CSWS (Continuous Surface Waves System) - . W porównaniu do innych metod geofizycznych stosowanych w szeroko pojętej geologii a w szczególności w geologii inżynierskiej, narzędzia te były do niedawna praktycznie nieznane w Polsce i stosunkowo mało rozpowszechnione na świecie. Za prekursorów metody i twórców nazwy SASW uważa się Heiseya, Stokoe'a i Mayera i omawiana jest ona po raz pierwszy w ich pracy *Moduli of pavement systems from SASW* [1]. Dalszą ewolucją tego nurtu jest metoda z ciągłym wzbudzaniem fali CSWS.

Obok metod polowych ważnym narzędziem w mojej pracy badawczej jest wspomniana powyżej metoda laboratoryjnych pomiarów prędkości fal – BET (*Bender Element Test*) [2]. Rozpowszechnienie tej metody jest większe niż wymienionych metod polowych, choć wciąż nie jest ona traktowana jako standardowe podejście badawcze.

Aby naświetlić szerszy kontekst podejścia do realizacji celów badawczych, należy w podjętych pracach wyróżnić :

- I. Wypracowanie metodologii badań oraz ich interpretacji
- II. Ocenę wiarygodności i dokładności metod, walidację wyników
  - a. Badania na poletkach reperowych, w zróżnicowanych warunkach geologicznych przy zastosowaniu metod SASW i CSWS, oraz 2 metod sondowań SCPT i SDMT (badania prowadzone przez ITB, opis poniżej), oraz na próbkach pobranych z tych poligonów metodą BET w laboratorium
  - b. Badania gruntów w głębokich wykopach realizowanych w Warszawie inwestycji

**Ad I** W początkowej fazie praca badawcza była skoncentrowana na stworzeniu i testowaniu metodologii badań oraz ich interpretacji, ponieważ nie istniały żadne unormowania czy nawet szeroko dostępne ujęcia podręcznikowe związane z tymi metodami. Wymagało to zatem zgromadzenia wiedzy i doświadczeń rozproszonych w literaturze światowej oraz skonfrontowania ich z wynikami własnych pomiarów zebranych na wczesnym etapie realizacji programu badawczego. W przypadku mało rozpowszechnionych metod doświadczenia poszczególnych badaczy odnoszone są partykularnie do stosowanej aparatury i narzędzi którymi dysponują. Prototypowy sprzęt jest często wytwarzany w zespołach badawczych skupionych w instytucjach naukowych, a więc jest najczęściej niepowtarzalny ze wszystkimi tego konsekwencjami. Wśród najistotniejszych jego cech należy wymienić unikalność rozwiązań technicznych, czasami radykalnie ograniczających, czy też po prostu ukierunkowujących możliwości wykorzystania danego urządzenia. Dobrym przykładem może być w odniesieniu do metod SASW/CSWS stosowana częstotliwość własna geofonów, czy też możliwości akwizycyjne (n.p. gęstość próbkowania zapisu przez aparaturę gromadzącą dane). Używany w moich badaniach model aparatury, mimo iż dostępny komercyjnie, była wyprodukowany kilku egzemplarzach. Stąd też wypracowanie autorskich rozwiązań w zakresie sposobu przeprowadzania badań oraz interpretacji ich wyników, jest koniecznym etapem wdrażania tej metodyki.

**Ad II** Drugim etapem była ocena wiarygodności i dokładności stosowanych metod oraz walidacja ich wyników. Ten etap był realizowany dwutorowo:

**Ad II a** Wykonanie badań na 6 poletkach reperowych oraz w laboratorium przy

zastosowaniu 5 różnych metod. Realizacja tego programu porównawczego była możliwa dzięki kilkuletniej planowej i ścisłej kooperacji z Instytutem Techniki Budowlanej (dr. inż. Tomasz Godlewski). Oprócz trzech metod opisywanych wcześniej jako mój wkład (SASW, CSWS, BET), po stronie ITB było wykonywanie badań polowymi metodami penetracyjnymi SCPT i SDMT, oraz również badania BET. Organizacyjnie, ze względu na wymiar czasowy, zaangażowanie sił i środków oraz charakter uzyskiwanych efektów współpraca ta była realizowana w formie stażu jaką w tej instytucji odbyłem (załącznik 4).

Efektem finalnym tej współpracy jest cykl artykułów i opracowanie monograficzne wymienione wśród publikacji wybranych jako udokumentowanie opisywanego osiągnięcia naukowego.

**Ad II b** Dzięki współpracy z dr hab. inż. Pawłem Popielskim z Politechniki Warszawskiej, możliwe było wykonanie badań na terenie sześciu prowadzonych w Warszawie inwestycji posadowionych w głębokich wykopach. Realizowany przeze mnie program badawczy obejmował rozpoznanie właściwości sprężystych gruntów, w nawiązaniu do kilku etapów głębenia wykopów. Takie unikalne w odniesieniu do zastosowań sejsmiki powierzchniowej podejście pozwoliło na wychwycenie wpływu odprężenia na zmiany sztywności gruntu. Natomiast zastosowanie danych z monitoringu odkształceń elementów konstrukcji w obliczeniowych „analizach odwrotnych”, umożliwiło porównawczą weryfikację wyników badań polowych SASW/CSWS i wstępne określanie relacji między maksymalnym a tzw. *operacyjnym* modułem ścinania. Pełniejszy opis tych aspektów zamieszczono niżej w punkcie 5 *Autoreferatu: Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych* podpunkt *Weryfikacja parametrów sztywności na bazie monitoringu*

Istotny w omawianych pracach aspekt walidacji wyników autorskich i propozycji metodycznych prezentowanych w niniejszym opisie była możliwy dzięki zaplanowaniu i zrealizowaniu ukierunkowanego programu współpracy z ITB i PW. Interpretacje badań polowych prowadzonych w ITB oraz modelowych obliczeń realizowanych w PW dostarczyły dobrze zweryfikowanych danych do porównań i korelacji różnych ujęć niezbędnych w wielostronnej charakterystyce sztywności ośrodka gruntowego. Interdyscyplinarny i międzyinstytucjonalny charakter działań naukowych znacząco wzbogacał efekty zaplanowanych zadań naukowych. Umożliwiał uzyskiwanie przez jej uczestników rozszerzenie wiedzy, umiejętności, w zakresie stosowania nowych narzędzi badawczych oraz kompetencji realizacyjnych.

Zagadnienia zawarte w ramach omawianego w Autoreferacie podstawowego osiągnięcia naukowego prezentowałem na 10 konferencjach krajowych i międzynarodowych. Wszystkich publikacji z moim współautorstwem dotyczących aspektów sztywności ośrodka gruntowego przedstawiam 19. Nawiązują one do różnych etapów procesu badawczego. Część z nich stanowi kolejne uzupełnianie, kontynuację i rozwinięcie etapowych rezultatów badań i doświadczeń merytorycznych. Do zaprezentowania finalnych efektów został wskazany zestaw kilku publikacji, które w moim odczuciu niosą najistotniejsze dane i dokumentują merytorycznie etapy wieloletniego programu badawczego. Syntetyczną, uporządkowaną prezentację metodyczną stanowi opracowanie monograficzne [I].

### Opis metod badawczych

W badaniach wykorzystywane były dwie metody inżynierskiej sejsmiki powierzchniowej: spektralna analiza fal powierzchniowych **SASW** (Spectral Analysis of Surface Waves) i ciągła analiza fal powierzchniowych **CSWS** (Continuous Surface Wave System), oraz laboratoryjne badania prędkości fal mechanicznych w gruntach **BET** (*Bender Element Test*) oparte o wzbudzanie oraz rejestrowanie fali przez przetworniki piezoceramiczne.

Podstawą nieinwazyjnych metod sejsmiki powierzchniowej jest idea pomiaru prędkości fali Rayleigh'a, czyli fali sejsmicznej poruszającej się blisko powierzchni granicy ośrodka. Ten typ fali jest fizycznie złożeniem fali podłużnej i poprzecznej, czego efektem jest elipsoidalny ruch cząstek wzbudzonego ośrodka o kierunku rotacji przeciwnym do kierunku przemieszczania się fali. Głębokość propagacji fali Rayleigha jest zależna od jej długości, i w przybliżeniu jej równa. Prędkość przemieszczania się zależy natomiast od częstotliwości fali, oraz cech fizycznych ośrodka i dzięki temu można wnioskować o parametrach sprężystych gruntu na podstawie pomierzonej prędkości.

**W systemie sejsmiki powierzchniowej SASW** fale wzbudza się poprzez impuls (przekazywany uderzeniem młotkiem bądź innym przedmiotem (w zależności od pożądanego zakresu częstotliwości)) co generuje szerokie spektrum częstotliwości. Fala rozchodzi się promieniście od źródła i dociera do geofonów (zwykle od 2 do 6) rozstawionych w linii prostej przechodzącej przez źródło, w znanych od niego odległościach. Oprogramowanie komputerowe analizuje przy pomocy algorytmów matematycznych widmo spektralne sygnału rejestrowanego z geofonów, w celu wyznaczenia obecnych w spectrum częstotliwości i przesunięcia fazowego każdej z nich.

**Zestaw CSWS** różni się od SASW zastosowaniem wzbudzenia fali przez elektromagnetyczny wibrator. W przypadku zastosowanej w prowadzonych badaniach aparatury miał on masę 63kg. Częstotliwość drgań może być programowana w zakresie 6-

600 Hz. Umożliwia to precyzyjniejsze kontrolowanie warunków pomiaru. Im niższa częstotliwość fali powierzchniowej tym większa strefa sprężystych odkształceń gruntu. Zmieniając zatem zakres częstotliwości generowanych fal powierzchniowych uzyskujemy różną głębokość badania.

**Laboratoryjna metoda BET** polega na pomiarze prędkości fal poprzecznych i podłużnych na próbce gruntu, preferencyjnie o nienaruszonej strukturze. Sięga ona historią zastosowań do roku 1978 [2]. Z technicznego punktu widzenia zarówno do wzbudzenia fali jak i rejestrowania jej rozchodzenia stosowane są elementy wykonane z kompozytów piezoelektrycznych. Odkształcając się w wyniku przyłożenia napięcia elektrycznego wzbudzają one mechaniczny ruch falowy ośrodka do którego są przyłożone. Fala po przejściu przez badany materiał dociera do elementu rejestrującego z drugiej strony próbki, który wzbudzony ruchem docierającej fali generuje sygnał elektryczny, który jest rejestrowany przez system akwizycji danych. Znając długość drogi i czas przejścia obliczamy prędkość badanej fali a na tej podstawie (znając gęstość gruntu) parametry sztywności gruntów. Metoda ta w prowadzonych badaniach była wykorzystywana wielokierunkowo. Dzięki bezpośredniemu charakterowi pomiaru i możliwości badania w dowolnym stanie naprężeń, wyniki służyły jako referencja dla badań pośrednich sejsmiką powierzchniową. Ale również samo narzędzie BET podlegało analizie w kontekście aspektów metodycznych z nim związanych.

#### Opis rezultatów osiągnięcia badawczego

Rezultaty osiągnięcia badawczego, w nawiązaniu do określonych celów, można podzielić na te o charakterze metodycznym i poznawczym.

#### 1. Rozwijanie metodyki pomiarów SASW/CSWS

##### 1.1. Weryfikacja przyjmowanej wartości czynnika podziału fali w interpretowaniu badań metodami sejsmiki powierzchniowej

Istotnym aspektem interpretacyjnym w metodzie SASW i CSWS jest sposób w jaki z eksperymentalnej krzywej dyspersji (czyli zależności częstotliwości od prędkości fali) otrzymuje się profil sztywności gruntu. Procedura ta zwana inwersją, może dawać zróżnicowane pod względem otrzymywanej dokładności wyniki. Zależą one także od liczby informacji dodatkowych charakteryzujących profil (np. miąższości warstw, gęstość objętościowa, współczynnik Poissona, i in.), które są niezbędne do analiz. Praktyczne zastosowanie szczegółowych rozwiązań metodycznych z uwagi na konieczność pozyskania i analizowania dużej liczby danych jest niejako wypadkową kompromisu między tym co można osiągnąć a tym jakim kosztem (czasu i pieniędzy) jesteśmy w stanie tego dokonać.

Z uwagi na wspomniane uwarunkowania jak również wymagania praktyczne sprawnego analizowania danych z różnych poligonów zastosowałem jedną z najprostszych metod inwersji, tzw. metodę czynnika podziału fali (*factored wavelength method*). Pozwala ona jednocześnie na natychmiastowy podgląd wyników w trakcie badania. Wiemy, że głębokość propagacji fali Rayleigh'a jest mniej więcej równa jej długości, oraz że rozkład energii jest nierównomierny i skoncentrowany w górnej części fali. Stąd założenie, że największy wpływ na parametry (prędkość) fali będzie miała warstwa od powierzchni do głębokości będącej ułamkiem długości fali. Głębokość tę można zapisać jako  $d = \lambda/x$ , gdzie  $x$  jest uzyskanym z analiz empirycznym optymalnym, ale jednocześnie arbitralnym czynnikiem podziału. W literaturze wartość ta podawana jest w przedziale 2-6.

- Jednym z postawionych przeze mnie w programie badawczym celów metodycznych było określenie wartości  $x$  najbardziej adekwatnych do interpretowania badań gruntów z terenu Polski. Poprzez analizy porównawcze parametrów uzyskanych metodami bezpośrednimi (sondowań SDMT i badań laboratoryjnych), optymalizowałem wartość czynnika podziału. Stwierdziłem, że przyjmowanie wartości 3 omawianego czynnika daje wyniki najlepiej skorelowane w rezultatach bezpośrednich badań. Jednocześnie w stworzonym algorytmie interpretacyjnym jest możliwość zindywidualizowania (zmiany) wartości współczynnika  $x$ , tak by w konkretnej sytuacji geologicznej można było zweryfikować i uzyskać lepsze dopasowanie wyników interpretacji geofizycznej i danych z innych metod, jeśli takie są dostępne.

## 1.2. Optymalizacja sposobu wzbudzania fal oraz komplementarność stosowania metod SASW i CSWS

W metodach sejsmiki powierzchniowej istotne są częstotliwości fal jakie udaje się wygenerować oraz ich amplituda. Największym problemem okazuje się wzbudzenie niskich częstotliwości (czyli fal o większej długości i tym samym większej głębokości penetracji podłoża) a jednocześnie o wystarczającej amplitudzie (aby tłumiona przez grunt fala docierała również do najdalszych geofonów). Jak wyżej wspomniano metody SASW i CSWS różnią się sposobem wzbudzania fal z czego wynikają różne zalety (+) i wady (-) ich stosowania :

- SASW - pojedyncze uderzenie, (tradycyjnie używa się 10kg młotka).  
(+) przenośny charakter i szybkość badania  
(-) przypadkowe spectrum generowanej częstotliwości
- CSWS opiera się na użyciu urządzenia elektromagnetycznego, mechanicznego

lub innej konstrukcji, generującego chwilowo stałą częstotliwość, po czym zmieniając ją na kolejną, aż do zakończenia cyklu, zgodnie z tym jak zostanie zaprogramowany.

(+) precyzja sterowania częstotliwością

(-) niska energia (amplituda) fal o niskiej częstotliwości w wyniku ograniczonej masy inercyjnej

Kluczem do efektywniejszego stosowania metody SASW było znalezienie źródła drgań które z jednej strony dałoby bardziej użyteczne spectrum częstotliwości fal i jednocześnie zachowało cechy urządzenia przenośnego, możliwego do obsługi przez jednego operatora. W wyniku szeregu eksperymentów i pomiarów ustaliłem, że uderzenie na podłoże wysokości 0,5-1,0m obciążnika w postaci koła samochodowego jest źródłem drgań o pożądanej i ustabilizowanej charakterystyce. Dzięki ciężarowi oraz pewnej elastyczności w momencie uderzenia na podłoże, widmo częstotliwości jakie uzyskuje się w ten sposób przesunięte jest znacząco w kierunku niższych wartości w porównaniu do klasycznego młotka, a przy tym amplitudy drgań są wyższe. Wynikiem tego jest większa głębokość propagacji oraz czytelny sygnał na geofonach, co jest szczególnie ważne w środowisku z dużymi zakłóceniami. Taka modyfikacja techniki wzbudzania fali połączonych dawała szczególnie pozytywne rezultaty w sytuacjach prowadzenia badań w warunkach miejskich z wszechobecnymi i ciągłymi zakłóceniami od pojazdów i maszyn.

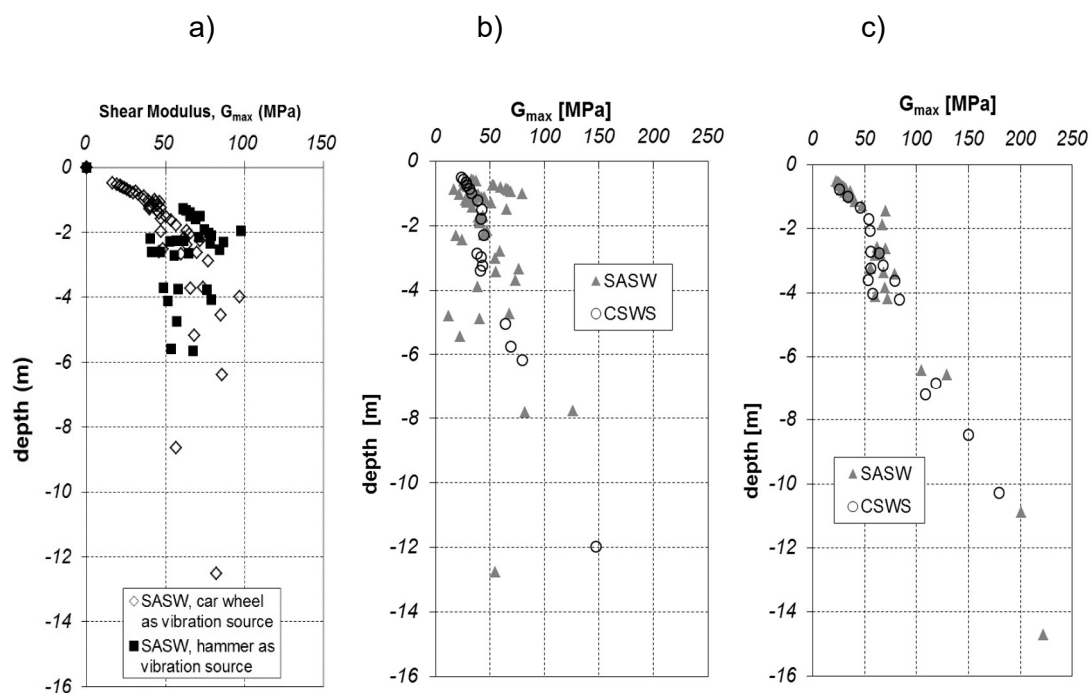


Fig. 2 a) Porównanie wyników SASW, przy użyciu dwóch źródeł fal, b) wpływ zakłóceń na wyniki SASW w porównaniu do CSWS, c) komplementarne użycie obu metod, SASW w zmodyfikowanej wersji wzbudzania fal.

Podsumowując:

- Opracowałem, przetestowałem i wykazałem użyteczność nowatorskiej metody wzbudzania drgań na potrzeby badań SASW. Dzięki temu użyteczność tej metody znacząco wzrosła. Podkreślam, że nie sam przedmiot użyty do wzbudzania jest tu istotą osiągnięcia, lecz sposób poszukiwania rozwiązania problemu metodycznego i optymalizacja tegoż rozwiązania.
- W moich badaniach dowiodłem zasadności komplementarnego stosowania obu narzędzi w celu maksymalnego wykorzystania ich potencjału i wzajemnie uzupełniającej, ale także weryfikującej ich roli. System CSWS w powodu niewielkiej masy inercyjnej najczęściej nie pozwalał na osiągnięcie głębokości większych niż 8-12m. Tym niemniej dzięki bezpośredniej aplikacji fali o stałej częstotliwości daje przy średnich i wyższych częstotliwościach doskonałe, odporne na zakłócenia wyniki referencyjne.
- Dzięki wypracowaniu nowej metody wzbudzania drgań dla SASW, stało się możliwe wiarygodne dowiązanie wyników tej metody i CSWS. Sumaryczna interpretacja wyników obu metod pozwala m.in. na łatwiejsze odrzucenie błędnych pomiarów (pochodzących np. z powtórnych odbić fali) których identyfikacja w inny sposób byłaby trudna lub czasem niemożliwa (fig.2)

### 1.3. Optymalizacja rozstawu geofonów w metodach SASW i CSWS

Tradycyjnie w metodach geofizycznych (refleksyjnych lub refrakcyjnych) od rozstawu geofonów zależy głębokość rozpoznania. Z uwagi na mechanizm rozchodzenia się fal (głównie podłużnej w tych metodach) większa odległość oznacza głębszą strefę rozpoznania struktur geologicznych. Częstotliwość sygnału nie ma takiego znaczenia, ważne aby amplituda sygnału była na tyle duża aby w danym ośrodku fala przemieszczała się na duże odległości.

W przypadku inżynierskiej sejsmiki powierzchniowej bazującej na pomiarze prędkości fali Rayleigh'a, sytuacja jest diametralnie odmienna. Pomiar z definicji ma być lokalny, przedmiotem zainteresowania jest sztywność podłoża określona dla lokalizacji przedstawianej jako profil pionowy 1D. Wszelkie odbicia i inny przebieg fali niż bezpośredni od źródła wzdłuż prostej linii do kolejnych geofonów jest niekorzystny.

Konieczność optymalizacji rozstawu geofonów wynikała z dwóch przeciwstawnych tendencji:

- Zbyt duży rozstaw geofonów powodował że zanikająca (tłumiona przez grunt) fala nie docierała do ostatnich geofonów z amplitudą pozwalającą na jej

jednoznaczne zidentyfikowanie (wystarczająca proporcja sygnału do zakłóceń);

- Zbyt mały rozstaw powodował natomiast rozrzut wyników z uwagi na ograniczoną rozdzielczość akwizycji i pogarszające się proporcje pomiędzy długością fali a odległością między geofonami.

Autorskie wnioski płynące z serii eksperymentów i analiz na 6 poletkach reperowych w zróżnicowanych warunkach geologicznych, przedstawiają się następująco:

- Proponuję stosowanie jednolitego rozstawu 0,5m jako najbardziej optymalnego. Mniejsze odległości mogą powodować istotne błędy pomiarowe, większe odległości - rozrzut wyników związany z niejednoznacznością interpretacją dojścia fali (tym samym pomiaru jej przesunięcia fazowego).
- Zmienną każdorazowo ustalaną w trakcie badania powinna być odległość źródła drgań od pierwszego geofonu. Wynika to z różnego stopnia tłumienia w poszczególnych gruntach oraz rodzaju źródła drgań. Odległość ta przy stosowanych przez mnie źródłach drgań wahała się w zakresie 0,5-2,0m.

## 2. Rozwijanie metodyki pomiarów BET

### 2.1. Aspekt wyboru częstotliwości w badaniu BET

Problematycznym czynnikiem badań BET jest dobór częstotliwości fali wykorzystanej w trakcie pomiaru. Rzutuje ona na wynik i zasadnym wydaje się postulat ujednolicenia metodyki w tym zakresie. Ze względu na zróżnicowanie geomateriałów i aparatury nie jest to łatwe lub wręcz wydaje się niemożliwe. Problem sprowadza się do tego, że trzeba eksperymentalnie dobierać parametry wejściowe badania (w tym częstotliwość) aby następnie uzyskiwać wiarygodny do interpretacji sygnał wyjściowy. Prace wielu badaczy i instytucji (np. [3], [4]) skoncentrowane są na ujednolicaniu metodyki i proponowaniu nowych lub uściślonych kryteriów obiektywizujących BET.

- Moją propozycją jest weryfikacja i sprecyzowanie kryterium doboru częstotliwości w nawiązaniu do wielkości próbki do badania.
- Stwierdziłem, że opisywane w literaturze [3] kryterium oparte o proporcje wymiaru próbki w kierunku propagacji fali do długości tej fali na poziomie minimum 2 okazuje się często niewystarczające.
- Seria badań przeprowadzonych przez mnie na gruboziarnistych piaskach wiślanych (próbki z głębokości 8m) przy zróżnicowanych stanach naprężenia wykazała, że wskaźnik ten może być wymagany na poziomie  $L/\lambda=3$ . Zaproponowałem w nawiązaniu do tego nowego kryterium diagram (fig.3) dla oszacowania doboru właściwych częstotliwości w zależności od wielkości próbki i

spodziewanych prędkości fali poprzecznej. Uważam, że to metodyczne novum porządkuje i ułatwia planowanie badań BET.

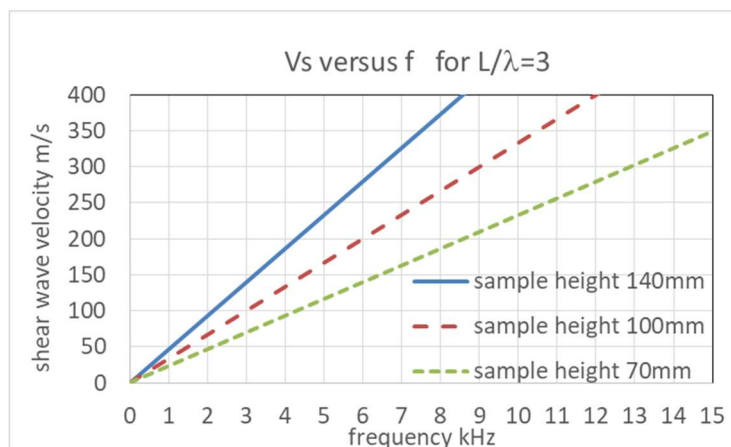


Fig. 3 Propozycja diagramu (według kryterium  $L/\lambda > 3$ ) do oszacowania właściwej częstotliwości fali w badaniu BET na podstawie wysokości próbki i spodziewanej prędkości fali

## 2.2. Interpretacja sygnału wyjściowego w domenie czasu

Drugim kluczowym aspektem wpływającym na miarodajność pomiarów BET w geomateriałach, jest interpretacja czasu przejścia fali. Interpretacja ta może być dokonywana w różny sposób [4] jako:

- metoda obserwacyjna, realizowana w domenie czasu
- analiza korelacji krzyżowej, realizowana w domenie czasu,
- analiza widmowa realizowana w domenie częstotliwości

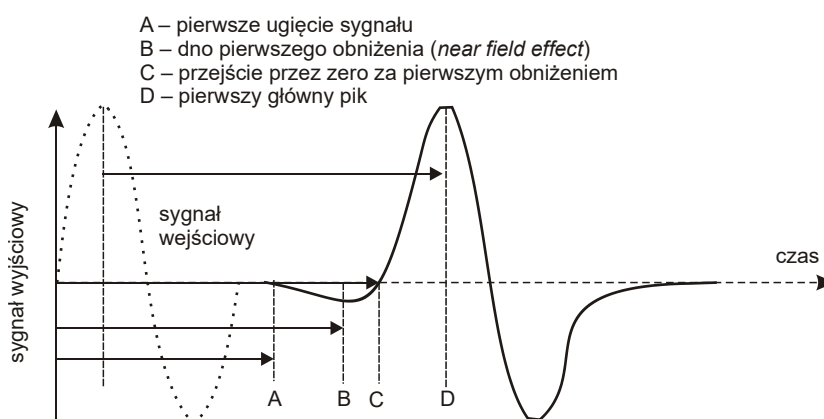


Fig. 4 Schemat typowego przebiegu odbiorczego sygnału fali S z zaznaczonym *near field effect* (Lee i Santamarina 2005, uzupełniony [6])

Najpopularniejszą jest metoda obserwacyjna. Określenie „domena czasu” oznacza że sygnał wyjściowy jest wizualizowany w postaci amplitudy reprezentowanej go wartości (wyrażonej np. w miliwoltach [mV]) w zależności od czasu (wyrażanym w BET najczęściej w milisekundach [ms]). Metoda obserwacyjna polega na wizualnej inspekcji zarejestrowanego sygnału i określenia charakterystycznego punktu sygnału wyjściowego, co służy interpretacji

czasu przejścia fali.

W literaturze [6] opisano kilka elementów kształtu które powinny służyć jako punkty referencyjne (fig.4). Zaleca się używanie któregoś z nich, oraz podawanie użytej metody. Z uwagi na nieregularność kształtu sygnału fali przechodzącej i często jego odmienność od tego schematu nie można ustalić ścisłej procedury, podejmowane są jednak próby częściowego chociaż jej zautomatyzowania, aby zobiektywizować wyniki.

Jedno z powszechnie dostępnych narzędzi mających służyć do takiej automatycznej interpretacji nosi nazwę BEAT (*bender element analysis tool*). Byłem zaproszony jako ekspert do oceny tego programu. Zaplanowany został w tym celu cykl badań na wspomnianych w poprzednim podrozdziale aluwialnych piaskach rzecznych oraz iłach plioceńskich z rejonu Bełchatowa (próbki z głębokości 17-108m). Wybór skrajnych pod wieloma względami gruntów był celowy.

- Program kilkudziesięciu badań w zróżnicowanych stanach naprężeń pozwolił mi stwierdzić, że stosowane do automatyzacji algorytmy sprawdzają się tylko w części przypadków. W badaniach holoceničkih piasków rzecznych wyniki były spójne zarówno przy manualnej jak i automatycznej interpretacji. Natomiast w przypadku przekonsolidowanych iłó w o złożonej historii naprężeń i procesów postsedymentacyjnych, software zawodził. Na obecnym etapie rozwoju aplikacji automatyzujących ich algorytmy nie są wystarczająco czułe i selektywne aby wykonać prawidłową interpretację

### 2.3. Proponowany algorytm planowania i weryfikacji badań BET

Powyższe szczegółowe wnioski zostały skompilowane w poniższy schemat blokowy (fig.5) , jako wytyczne do planowania i sposobu oceny wiarygodności wyników.

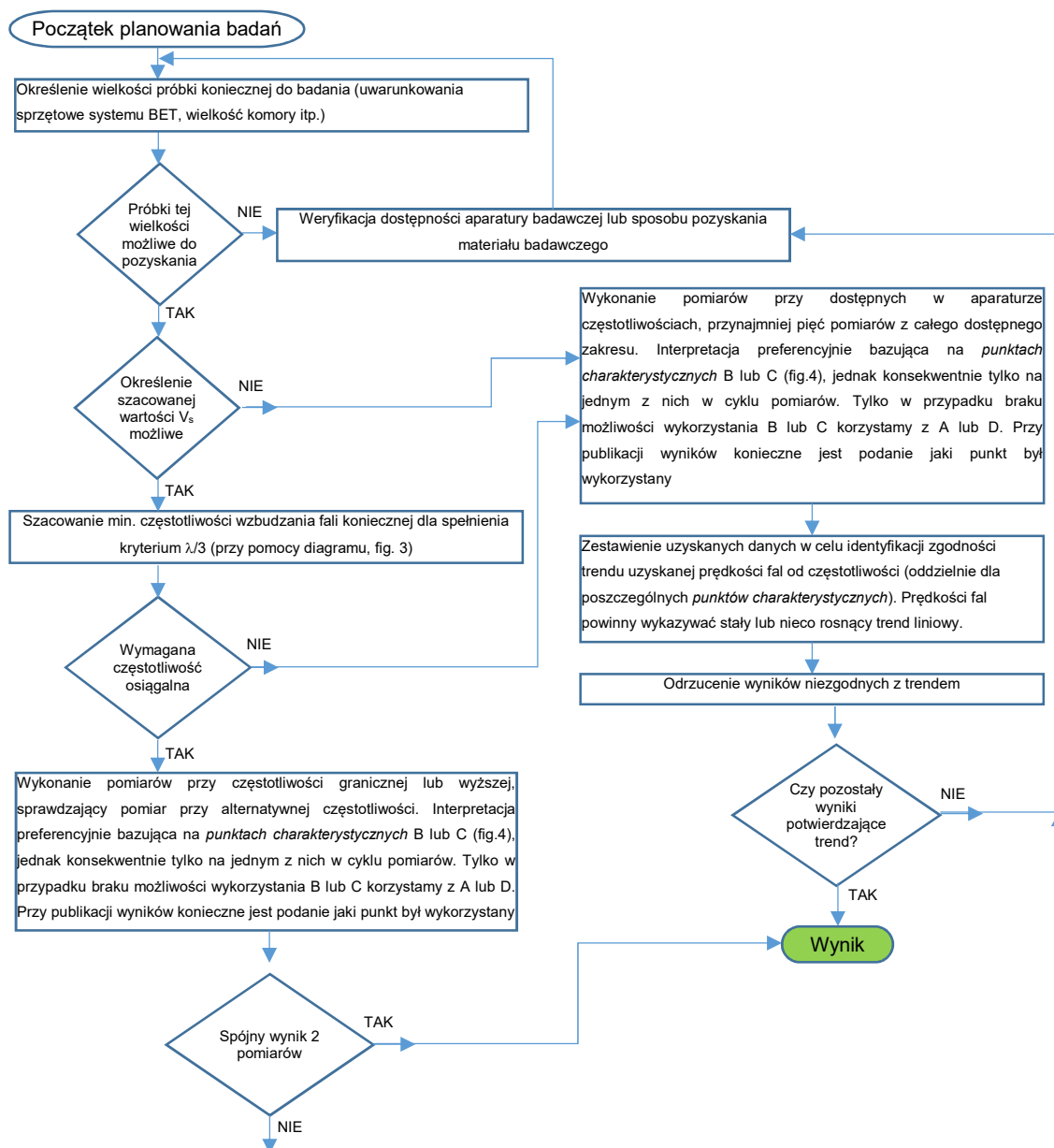


Fig. 5 Proponowana procedura planowania badań BET.

### 3. Charakterystyki sztywności różnych typów gruntów

Przeprowadzone przeze mnie na potrzeby realizacji omawianego programu naukowego badania metodami geofizyki powierzchniowej wykorzystującymi falę Rayleigha w konfiguracji CSWS i SASW oraz metodą laboratoryjną BET dotyczyły różnych typów gruntów rejonu Warszawy i okolic.

Wytypowano grunty o zróżnicowanych właściwościach, litologii i genezie, kierując się opisywaną przez Robertsona [5] zasadą klasyfikacyjną SBT (Soil Behavior Type). Były to:

- mio-plioceńskie iły formacji poznańskiej (przekonsolidowane OC),
- plejstocieńskie, zastoiskowe iły warwowe (wykazujące pozorną prekonsolidację ~OC) o silnej anizotropowości,
- plejstocieńskie gliny zwałowe zlodowacenia Warty i Odry (przekonsolidowane OC),
- wczesno holocieńskie i późno plejstocieńskie piaski rzeczne (normalnie skonsolidowane NC),
- przekonsolidowane eemskie jeziorne osady organiczne - gytie (OC),
- współczesne grunty pylasto-ilaste akumulacji rzecznej – mady (NC)

Kilkuletni (2010-2013) program badań obejmował:

- 6 poligonów badawczych
- badania metodami SASW, CSWS, BET wykonywane przeze mnie, oraz SDMT, SCPT, BET, realizowane przez współpracujący ośrodek naukowo badawczy (Tomasz Godlewski, ITB)
- ilościowo było to kilka-kilkanaście profili badawczych na każdym poligonie, łącznie kilkaset pomiarów na każdym poligonie

Omawiany program badawczy miał w ujęciu regionalnym i metodycznym znacząco nowatorski charakter i dostarczył nieznanych dotąd danych opisujących właściwości mechaniczne gruntów.

Uzyskano i podano miarodajne charakterystyki sztywności dla 6 wyróżnionych powyżej grup gruntów w nawiązaniu do ich typowego występowania głębokościowego. Opracowano dla 5 grup gruntów (wymienione powyżej oprócz ilów warwowych) krzywe zależności sztywności od odkształcenia, będące opisem zachowania tych materiałów w szerokim zakresie odkształceń przy określonych stanach naprężeń.

- Dzięki zastosowaniu pomiarów terenowych i laboratoryjnych określono maksymalne wartości sztywności oraz połączono te dane z charakterystykami uzyskanymi w badaniach trójosiowego ściskania (z napróbkowym pomiarem

małych odkształceń) (fig.6, fig.7).

- Synteza uzyskanych autorskich wyników pozwoliła na zestawienie wcześniej nigdzie nie publikowanych charakterystyk sztywności gruntów Polski, co stanowi komparatywny wkład w doświadczenia z innych rejonów świata.

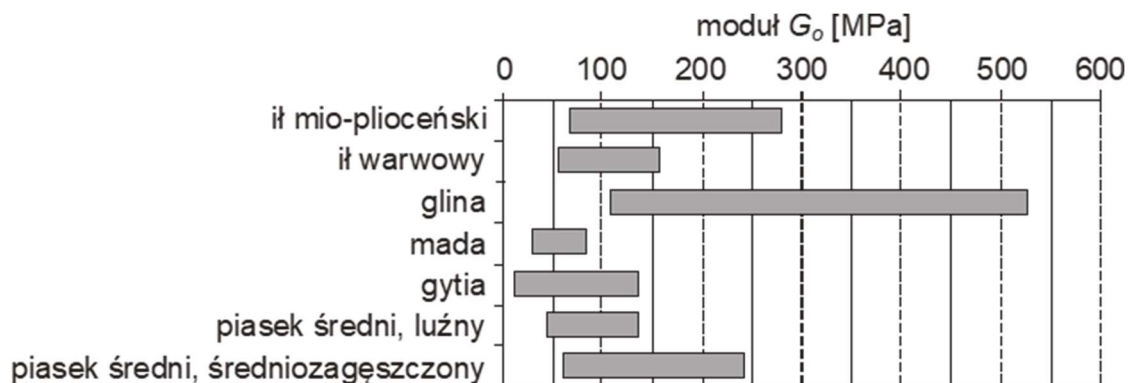


Fig. 6 Moduły ścinania  $G_0$  wyznaczone w zakresie naprężeń in situ (50-350 kPa) dla analizowanych sześciu typów gruntów z okolic Warszawy

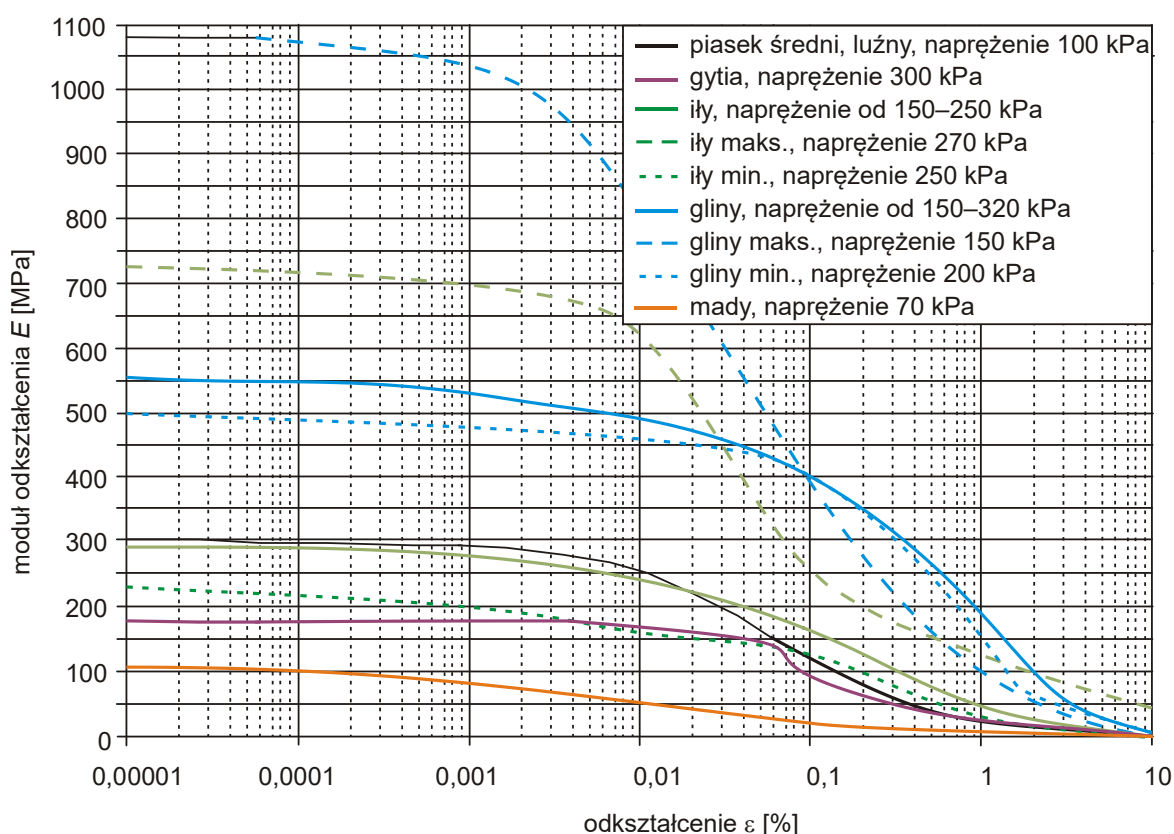


Fig. 7 Moduły odkształcenia ( $E$ ) w zależności od wielkości odkształceń uzyskane z badania „trójosiowego” TRX CIU oraz pomiarów prędkości fali poprzecznej z metody BET w formie krzywych sztywności, zestawienie zbiorcze

Tego typu zestawiania, zawierające dane w postaci profili sztywności, diagramów określających zakresy parametrów sztywności dla szeroko rozpowszechnionych typów

gruntów, oraz krzywych rozkładu sztywności mają unikalny charakter i stanowią autorskie oryginalne poszerzenie zakresu wiedzy geologiczno-inżynierskiej.

#### 4. Podsumowanie

- Na prezentowane osiągnięcie naukowe składa się szereg elementów metodycznych dotyczących badań SASW, CSWS, BET, które poddano w moich pracach i na forum specjalistycznym dyskusji. Szereg ujęć zweryfikowano, zmodyfikowano, lub zaproponowano w nowej postaci.
- Uzyskane rozwiązania mają zróżnicowaną wagę, obrazując jednak proces dedukcyjny jaki powinien cechować pogłębione, celowo ukierunkowane podejście w projektowaniu i realizacji badań naukowych. Szczególnie ważne w posługiwaniu się narzędziami badawczymi muszą być świadomość oraz identyfikacja ich ograniczeń. Krytyczną ocenę końcowych charakterystyk materiałowych umożliwiają szeroko stosowane porównania warunków i rezultatów uzyskiwanych w ramach paralelnych metod badawczych.
- Część osiągnięcia naukowego dotycząca opracowania danych na temat utworów geologicznych będących konkretnym podłożem różnych obiektów geologiczno-inżynierskim jest ważnym wkładem w stan wiedzy geologiczno – inżynierskiej i rozpoznanie gruntów, od strony praktycznej ułatwiającym bezpieczne i ekonomiczne projektowanie obiektów inżynierskich. Baza danych służąca do stworzenia tych zestawień to szacunkowo 3500-4000 pomiarów terenowych i laboratoryjnych, uzyskanych 5 odmiennymi metodami (w tym trzema stosowanymi przez habilitanta).
- Efekty opisywanego osiągnięcia mogą służyć w praktyce geologiczno-inżynierskiej i geotechnicznej zarówno od strony wskazań metodycznych projektowania i wykonywania pomiarów, jak również od strony zestawionych charakterystycznych sztywności gruntów – ich wykorzystania do pogłębionej analizy parametrów gruntów rozpoznawanego podłoża budowlanego.
- Co do kierunków dalszych prac w tej tematyce, wyróżniłbym tu dwa pola działań.
  - Metodyka badań powinna i będzie ewoluowała wraz z upowszechnieniem i ewolucją opisywanych metod badawczych. W tej pracy rozpatrywane elementy metodyczne nieuchronnie nawiązywały do rodzaju posiadanej aparatury i geologicznego materiału badawczego, co naturalnie powoduje brak pełnej uniwersalności wniosków i wyników. Jest to jednak nieuchronne w tej dziedzinie wiedzy i jest jednocześnie motorem do dalszych badań. Szczególnie

zmiany zachodzące w podejściu do sprzętu badawczego (jak na przykład upowszechnianie aparatury wielokanałowej MASW zastępującej SASW) i zaawansowanej numerycznej interpretacji metod sejsmiki powierzchniowej, może stopniowo zmieniać proporcje wykorzystania poszczególnych metod.

- Dążność do wzbogacania wiedzy lokalnej i regionalnej na temat charakterystyk materiałowych poszczególnych typów gruntów, to powszechnie zauważalna tendencja światowa. Wiedza ta ma ułatwiać projektowanie, dawać pewną referencję, optymalizować koszty badań. Z drugiej strony geologia jako nauka utwierdza nas w przekonaniu, że złożoność genezy geomateriałów nigdy nie da nam „komfortu” poznania pełnej i pewnej ich charakterystyki. Tym niemniej systematyczne wzbogacanie tej bazy danych jest niewątpliwie celem badawczym samym w sobie.

#### Bibliografia:

1. Heisey J. S., Stokoe K. H. II, Meyer A.H.: Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves Transp. Res. Rec., vol. 852, pp. 22-31, 1982.
2. Shirley, D. J. and Hampton, L. D., Shear-wave measurement in laboratory sediments, J Acoust Soc Am, 63, pp. 607-613, 1978.
3. Camacho-Tauta, J. F., Alvarez J. D. J., Reyes-Ortiz O. J.: A procedure to calibrate and perform the bender element test. Dyna rev. fac. nac. minas [online]. 2012, vol.79, n.176, pp. 10-18.
4. Yamashita S., Kawaguchi T., Nakata Y., Mikami T., Fujiwara T., Shibuya S. Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements. Soils and Foundations 49 (4), 631-650. 2009.
5. Robertson P. K.: Interpretation of cone penetration tests – unified approach. Can. Geotech. J. 46, 1337-1355, 2009
6. Lee J. S., Santamarina J. C.: Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE 2004

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

### WERYFIKACJA PARAMETRÓW SZTYWNOŚCI NA BAZIE MONITORINGU

Publikacje zawierające elementy tego osiągnięcia:

*Barański M., Popielski P., Szczepański T., Wrona M., 2008, Analiza możliwości weryfikacji modelu numerycznego na podstawie pomiarów i badań wykonanych w trakcie realizacji obiektu. CZASOPISMO TECHNICZNE - ŚRODOWISKO Tom 12 Nr 1-Ś r. 2007, str. 3-16*

*Barański M., Dąbska A., Popielski P., Szczepański T. 2008, Numerical model verification on the basis of the measurements and investigation carried out during the structure realization, w: Proceedings of the International Geotechnical Conference: Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering, Saint Petersburg 16-19 June 2008, str. 173-179, NPO Georeconstruction-Fundamentproject, r. 2008*

*Barański M., Popielski P., Szczepański T., 2008, Analiza numeryczna odprężenia gruntu w głębokich wykopach ze względu na sztywność. CZASOPISMO TECHNICZNE - ŚRODOWISKO Tom 3 r. 2008, str. 3-20*

Aspekty badawcze zawarte w wymienionych powyżej pracach, ściśle wiążą się z głównym osiągnięciem naukowym, odnoszą się do etapu weryfikacji otrzymywanych wartości sztywności w odniesieniu do pomiarów monitoringu odkształceń konstrukcji budowlanych. Ze względu na fakt, że autorem analiz metodami elementów skończonych (MES) i opracowania danych monitoringu jest dr hab. inż. Paweł Popielski, nie zostały one wykazane jako element mojego głównego osiągnięcia naukowego.

- Na podkreślenie zasługuje fakt, że nowatorska koncepcja związana z pomiarami sztywności wykonywanymi w głębokich wykopach na różnych etapach realizacji i ich interpretacja była realizowana w ramach współpracy naukowej przeze mnie. Nie dotarłem w literaturze do podobnych badań.
- Dzięki tej koncepcji badań udało mi się wychwycić redukcję sztywności gruntu pod dnem wykopu w wyniku odprężenia. Do tej pory obserwowano efekt tego zjawiska w postaci podniesienia dna wykopu, teraz udało się go stwierdzić w zmianie parametrów podłoża. To zjawisko jest widoczne w profilu

zdominowanym przez grunty piaszczyste na figurze 7b.

- W toku badań analizowałem wyniki również pod kątem określania współczynnika który najlepiej określałby relację pomiędzy mierzonym maksymalnym modułem ścinania  $G_{\max}$  (właściwym dla bardzo małych odkształceń na poziomie  $< 10^{-5} \%$ ) a modułem tzw. operacyjnym, czyli właściwym dla poziomych odkształceń generujących się w trakcie współpracy gruntu w budowlą [1]. Wiąże się to z nieliniową zależnością sztywności od odkształcenia w gruncie. Badania wykonywane we współpracy z Politechniką Warszawską pozwoliły na zaproponowanie [2] współczynników redukcyjnych dla typowych gruntów warszawskich.

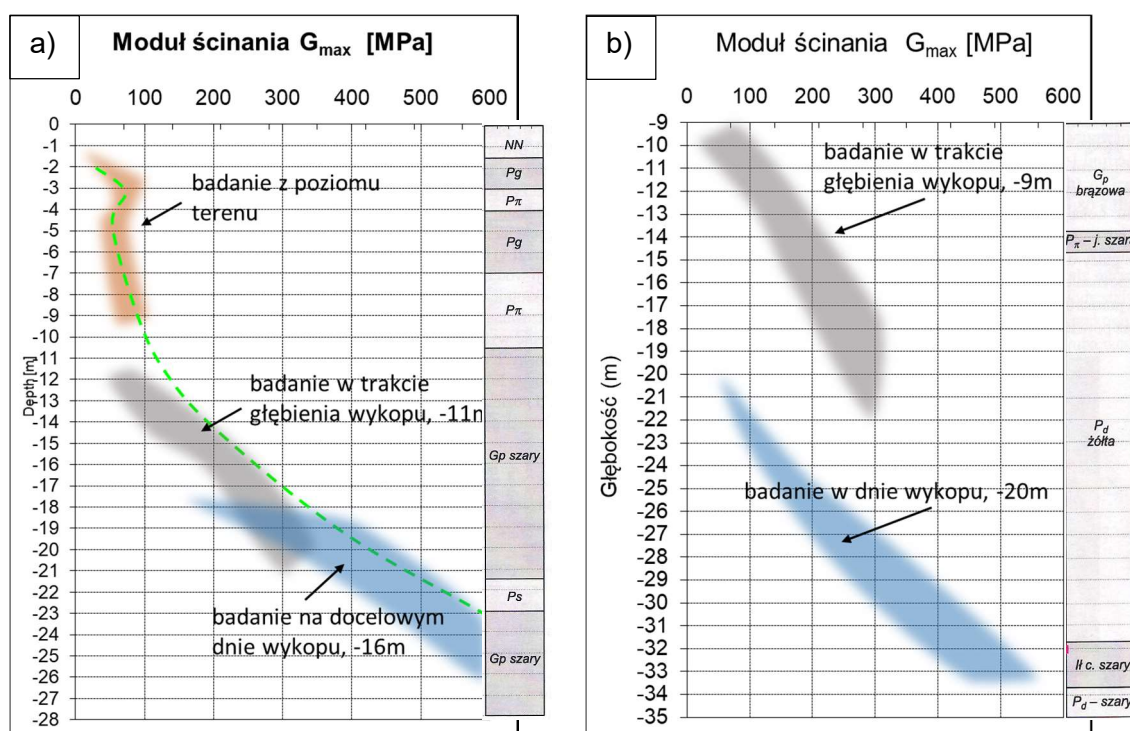


Fig. 8. Przykładowe, zgeneralizowane profile sztywności na tle profilu geologicznego, skompilowane z wyników z kilku etapów głębienia wykopu

1. Matthews M.C., Clayton C.R.I., Own Y.: The use of geophysical techniques to determine geotechnical stiffness parameters. Proc. Instn. Civ. Engrs Geot. Eng, 143, 31-42, 2000.
2. Popielski P.: Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. Prace Naukowe-Inżynieria Środowiska PW, z.61, 2012

# METODY SEJMIKI POWIERZCHNIOWEJ I BET W OCENIE JAKOŚCI WZMACNIANIA PODŁOŻA

Publikacja zawierająca elementy tego osiągnięcia:

*Rees S., Szczepański T., Sutton J., Snelling K. Surface wave geophysics and laboratory bender element methods for use in ground improvement assessment. w: Proceedings of the International Conference on Ground Improvement & Ground Control Transport Infrastructure Development and Natural Hazards Mitigation, 30 October - 2 November Wollongong, Australia, str. 1681-1686, Research Publishing, r. 2012*

Artykuł powyższy był próbą eksploracji pola wykorzystania metod sejsmiki powierzchniowej i BET na cele ilościowej lub jakościowej oceny zabiegów geoinżynierskich wzmocnienia (stabilizacji) podłoża. Jest w tych metodach potencjał dla takiej aplikacji [1]. Krótki czas badania i nieinwazyjny charakter predestynuje metody SASW/CSWS do bycia wykorzystywanymi do monitorowania skuteczności poprawy właściwości podłoża. Kontynuacja tej tematyki badawczej wymagać będzie ścisłej kooperacji z wykonawcami wzmocnienia podłoża, aby możliwe było wykonywanie badań przed i po zabiegach.

- W artykule przedstawiłem natomiast autorskie unikalne wyniki przyrostu sztywności w ilach mio-pliocenowych z terenu Warszawy oraz w ilach eocenowych z rejonu Sahary. Przyrost  $G_{max}$  wielkości blisko 50% następował w okresie około tygodnia, w uprzednio rekonstruowanych próbkach w wyniku zachodzących w materiale procesów starzenia (*ageing*), dających – jak proponuję to nazywać – efekt wzmocnienia strukturalnego. Badania modelowe polegały na badaniu próbek pozbawionych pierwotnej struktury, powtórnie formowanych przed każdym badaniem (powtarzanym kilkakrotnie na tym samym materiale). Wykazały one powtarzalność tego procesu i efektu końcowego. Doświadczenia te są ilościowym potwierdzeniem skali zjawiska poprawy własności mechanicznych geomateriałów zachodzących w czasie po redpozycji (np. na skutek prac ziemnych).

1. Moxhay, A. L., Tinsley, R. D. and Sutton, J. A. (2001). Monitoring of soil stiffness during ground improvement using seismic surface waves. *Ground Engineering*. 34 (1): 34–37.

## ZASTOSOWANIE SASW/CSWS W ROZPOZNANIE SUFOZJI

Publikacje zawierające elementy tego osiągnięcia:

*Barański M., Kłobukowski D., Makowski R., Popielski P., Szczepański T., 2013, Analiza możliwości wykorzystania geofizycznych metod sejsmiki powierzchniowej do oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. CZASOPISMO TECHNICZNE, Tom: 27, Zeszyt: 3,*

*Mieszkowski R., Kowalczyk S., Barański M., Szczepański T., 2014, Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania powierzchni stropowej gruntów słabo przepuszczalnych oraz wyznaczenia stref rozluźnienia w korpusie zapory ziemnej. ZESZYTY NAUKOWE INSTYTUTU GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIĄ PAN, Tom: 86*

Badania opisane w powyższych artykułach odpowiadały na zapotrzebowanie wykorzystania metod sejsmiki powierzchniowej jako wspomagającej dla rozpoznania rozluźnień w podłożu gruntowym pojawiających się w związku z procesami sufozji. Analizowane przypadki nawiązywały do konieczności monitorowania budowli hydrotechnicznych (wałów przeciwpowodziowych oraz zapory ziemnej) pod kątem zaawansowania procesu sufozji. Ważnym aspektem odróżniającym takie zastosowanie jest jakościowy charakter analizy danych, gdzie najistotniejsze jest stwierdzenie anomalii i odstępstw od trendu a nie bezwzględnej wartości parametrów prędkości fali czy sztywności ośrodka.

- Najistotniejszymi wnioskami z tych badań jest stwierdzenie przydatności metod sejsmiki powierzchniowej jako dodatkowego, uzupełniającego narzędzia w tego typu rozpoznaniu. Jednak ze względu na pośredni charakter i związaną z tym ograniczoną rozdzielczość, twierdzę, że metoda stosowana samodzielnie nie jest w żadnym razie w stanie dać jednoznacznej lokalizacji czy stopnia rozluźnienia (zaawansowania sufozji).

# BADANIE PREKONSOLIDACJI GRUNTÓW W KONTEKŚCIE PARAMETRÓW INHERENTNYCH.

Publikacje zawierające elementy tego osiągnięcia:

*Szczepański T., 2007, OCR a YSR, czyli klasyczne i współczesne poglądy na prekonsolidację gruntów ilastych. Przegląd Geologiczny vol. 55, nr 5, 2007, str. 405-410.*

*Szczepański T., 2007, Przykłady zastosowań koncepcji parametrów inherentnych w badaniach gruntów spoistych, Geologos vol. 11, 2007, str. 491-498.*

*Szczepański T., Nowa metoda oceny stanu przekonsolidowania gruntów. w: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych., str. 447-452, Wydawnictwo Uczelniane UTP, r. 2009*

Tematyka oscyluje wokół oceny stanu skonsolidowania gruntów spoistych, udziału prekonsolidacji mechanicznej i wzmocnienia strukturalnego w efekcie końcowym opisywanym najczęściej klasycznym wskaźnikiem prekonsolidacji OCR.

- Poprzez wykorzystanie koncepcji parametrów inherentnych i analizę modelowych badań na pastach gruntowych, wykazałem że procesy „starzenia gruntu” nawet w mikroskali czasowej (w kontekście geologicznym) tygodni czy miesięcy wpływają na interpretowane naprężenie uplastycznienia (klasyczne określenie: naprężenie prekonsolidacji).
  - W związku z tym poddałem dyskusji zasadność klasycznej nomenklatury Casagrande’a [1] związanej z opisem prekonsolidacji, z propozycją wykorzystania nomenklatury Burland’a [2], wzbogaconej o własne propozycje określeń (np. wzmocnienie strukturalne)
  - Zaproponowałem nową, oryginalną procedurę i parametr określania stanu przekonsolidowania gruntów, nazwanego liczbą przekonsolidowania OCN.
1. CASAGRANDE (1936) The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. *Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Vol.3, pp.60-64.
  2. BURLAND, J.B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* 40, no. 3, 329-378.

## FILTRACYJNE I OBCIĄŻENIOWE ASPEKTY PROJEKTOWANIA BADAŃ ŚCISŁIWOŚCI

Publikacje zawierające elementy tego osiągnięcia:

*Kowalczyk S., Szczepański T., Dobak P., 2013, Charakterystyka rozkładu ciśnienia porowego w badaniach konsolidacji past gruntowych z północnopolskich glin zwałowych. BUDOWNICTWO I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, Tom: 4 Zeszyt: 2*

*Dobak P., Szczepański T., Kowalczyk S., 2015, Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. GEOLOGICAL QUARTERLY Tom: 59 Zeszyt: 2*

*Tomasz Białobrzeski, Paweł Dobak, Tomasz Szczepański, Piotr Zawrzykraj, 2017, Warunki obciążania jako czynnik rzutujący na odkształcalność osadów deltowych z zachodniej części Żuław Wiślanych, Przegląd Geologiczny, vol. 65, nr 10/2, 2017*

*Dobak, P., Kiełbasiński, K., Szczepański, T., et al. (2018). Verification of compressibility and consolidation parameters of varved clays from Radzymin (Central Poland) based on direct observations of settlements of road embankment. Open Geosciences, 10(1), pp. 911-924. Retrieved 16 Jan. 2019, from doi:10.1515/geo-2018-0072*

Ważnym aspektem badawczym jest dla mnie rozwijanie metod badawczych konsolidacji, w szczególności opartych o programy ciągłego przyrostu obciążenia (CL). Taki sposób prowadzenia badań ścisłości ma wiele potencjalnych zalet, na przykład znaczące skrócenie czasu badania. Wiąże się jednak z wieloma trudnościami dotyczącymi programowania cyklu badawczego (przede wszystkim określenia prawidłowej pod kątem miarodajności wyników, prędkości przykładania obciążenia).

- Powyższe prace wpisują się w tę problematykę proponując nowatorskie rozwiązania analityczne takie jak separowanie fazy ustalonej i nieustalonej na podstawie rozkładu mobilizowanego ciśnienia porowego, czy specyficznego etapowania obciążenia.

## BADANIE FILTRACJI W GRUNTACH SŁABO PRZEPUSZCZALNYCH

Publikacja zawierająca elementy tego osiągnięcia:

*Szczepański T., Wójcik E., Gawriuczenkow I., 2011, Zmienność współczynnika filtracji w zależności od spadku hydraulicznego na przykładzie badań glin z miejscowości Różanka. BIULETYN PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU GEOLOGICZNEGO Tom 446 (2) r. 2011, str. 417-422*

Artykuł miał na celu wykazanie że pomimo istotności jaką ma współczynnik filtracji w ocenie przydatności gruntów słabo przepuszczalnych jako barier izolacyjnych, niedoprecyzowana jest metodyka jego oznaczania.

Jak pokazują dane literaturowe i zawarte w artykule wyniki, dobór spadku hydraulicznego ma wpływ na wartość otrzymanego  $k$ . Wytyczne do badań (np. instrukcja ITB 339/96) mówią o przyjmowaniu spadku 30, lub zakładanego w projekcie, pojawiają się też sformułowania – stosować gradient taki jak w terenie (PKN-CEN ISO/TS 17892-11:2009).

- W artykule wykazano, że różnica we współczynniku filtracji  $k$  dla  $i=30$  a  $i=7$  może być prawie 3 krotna, przy czym warto podkreślić że ta bardziej niekorzystna z punktu widzenia izolacyjności gruntu jest zmierzona przy niskim spadku.
- Biorąc pod uwagę nieliniową charakterystykę przepływu w gruntach przy bardzo małych i bardzo dużych spadkach, zjawisko kontrakcji, możliwości aparaturowe (dokładność pomiarów przepływu), wydaje się że dobranie jakiegoś uniwersalnego spadku hydraulicznego do badań gruntów nie jest możliwe. Dlatego zaproponowałem metodykę badań przy kilku różnych spadkach, aby możliwie zbliżyć się do warunków rzeczywistych, a jednocześnie wychwycić trendy zmienności i najbardziej niekorzystne warunki pracy gruntu (przejawiające się największą przepuszczalnością). Kluczowa (po raz kolejny) okazuje się świadomość wpływu danego aspektu metodycznego na wynik.

## STAN NASYCENIA GRUNTÓW W BADANIACH LABORATORYJNYCH

Publikacja:

*Szczepański T., 2017, Saturating overconsolidated cohesive soils – theory and standards versus reality, w: In situ and laboratory characterisation of OC subsoil, Poznań University of Life Sciences, r. str.: 93-100, r. 2017*

Podstawowym dogmatem współczesnej mechaniki gruntów nasyconych jest

zależność między naprężeniami całkowitymi a efektywnymi i ciśnieniem wody w porach gruntu. Zasada ta determinuje nasze podejście do laboratoryjnych badań wytrzymałościowych i ściśliwości. Wymusza też konieczność nasycania próbek przed badaniem, alternatywą jest korzystanie z bardzo mało w praktyce rozpowszechnionych rozwiązań mechaniki gruntów nienasyconych. Ta druga ścieżka, choć merytorycznie uzasadniona jest póki co zbyt mało efektywna czasowo ekonomicznie.

Tak więc tradycyjne podejście wiąże się z koniecznością nasycania, oraz co o wiele trudniejsze – koniecznością sprawdzania skuteczności tego procesu, czyli stopnia nasycenia. Dokonywanie tego przy pomocy w zasadzie jedynej dostępnej, a jednocześnie bardzo niedoskonałej metody opartej o parametr  $B$  Skempton, jest moim zdaniem zasadne dla bardzo wąskiej grupy gruntów. Pozostałe wymykają się tej metodyce stosowanej wprost, bez implementacji koniecznego tu doświadczenia i krytycznej oceny oraz wybiórczej implementacji zaleceń normowych.

- W publikacji wykazałem niespójności i zróżnicowanie w zaleceniach 4 norm (ASTM, BS, CEN-ISO, AS) oraz klasycznego podręcznika laboratoryjnych metod badawczych [1]
- Zaproponowałem również wynikające z doświadczenia propozycje praktyczne dotyczące procedury nasycania, pozwalające na uniknięcie błędów oceny parametru  $B$  Skempton.

1. Head, K. H., (1986) "Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. 3: Effective Stress Tests", Pentech Press, London

## WYTRZYMAŁOŚCIOWE BADANIA MODELOWE NA POTRZEBY ANALIZ ARCHEOLOGICZNYCH

Publikacje zawierające elementy tego osiągnięcia:

*Jerzy Trzciński, Małgorzata Zaremba, Sławomir Rzepka, Fabian Welc, Tomasz Szczepański, 2016, Preliminary Report on Engineering Properties and Environmental Resistance of Ancient Mud Bricks from Tell El-Retaba Archaeological Site in the Nile Delta, Studia Quaternaria, vol. 33, no. 1 (2016): 47–56*

*Jerzy Trzciński, Małgorzata Zaremba, Sławomir Rzepka, Witold Bogusz, Tomasz Godlewski, Tomasz Szczepański, 2016, Preliminary back analysis of the height of mud brick fortifications based on geoarcheological data at Tell El-Retaba Site in Egypt, Studia Quaternaria, vol. 34, no. 2 (2017): 99–108*

Artykuły powyższe prezentują m.in próbę odtworzenia właściwości mechanicznych

geomateriału używanego w starożytnym budownictwie – cegieł mułowych. Ich obecny stan jest wynikiem deterioracji, a próba zamodelowania ich oryginalnych właściwości bazowała na ustaleniu reprezentatywnego składu mineralnego i granulometrycznego, oraz procesu formowania cegieł.

- Jestem współautorem metodyki tych badań oraz wykonania badań wytrzymałościowych, czego późniejszym efektem była symulacja numeryczna konstrukcji murów obronnych.

## APLIKACYJNE BADANIA NAUKOWE Z WYKORZYSTANIEM METOD SEJSMIKI POWIERZCHNIOWEJ PROWADZONE WE WSPÓŁPRACY Z JEDNOSTKAMI NAUKOWO BADAWCZYMI

Przykładami poniższych badań chciałbym uwypuklić aplikacyjny charakter stosowanych metod, oraz podkreślić swoje zaangażowanie w zdobywanie realnych doświadczeń i konfrontowaniu wypracowanych podejść metodologicznych w warunkach praktycznych. We wszystkich wymienionych poniżej zadaniach badawczych wykonywałem i interpretowałem badania SASW/SCSW. Sposób i rodzaj interpretacji był bardzo zróżnicowany i zależał od celu badawczego.

- Badania w Egipcie (Deir el Bahari) na potrzeby poszukiwań archeologicznych dla Polskiej Misji Skalnej, prowadzonej przez archeologów z Uniwersytetu Warszawskiego (2006).

Poszukiwania miały na celu zlokalizowanie pustek skalnych w eoceńskich wapieniach, potencjalnie mogących być starożytnym grobowcem, w trudnodostępnym terenie półek skalnych. Przyjąłem procedurę polegającą na szukaniu anomalii polegającej na zaniku propagacji wgłębnej i rozrzutu wyników na granicy kontrastu gęstości ośrodków. Określiłem wartości sztywności charakterystyczne dla niespękanego podłoża, co stanowiło tło i punkt odniesienia poszukiwania anomalii. Wytypowałem kilka miejsc potencjalnego występowania pustek. Nie było możliwości ostatecznego zweryfikowania podejrzanych lokalizacji (brak zgody na inwazyjną ingerencję w podłoże). Tym niemniej doświadczenia zebrane przy tych badaniach były bardzo cenne dla późniejszych dociekań metodologicznych.

- Współpraca naukowa z Politechniką Warszawską (2006-2012) - 6 cykli badawczych (kilkuetapowych) w obiektach posadowionych w głębokich wykopach (Warszawa).

Badania realizowane były w głębokich wykopach obiektów budowlanych na terenie Warszawy. Ich celem było rozpoznanie parametrów sztywności na potrzeby sprawdzania hipotezy o możliwości weryfikacji założeń projektowych w trakcie realizacji konstrukcji. Badania wykonywałem na różnych etapach realizacji głębokich wykopów. Wyniki opisałem w części: *WERYFIKACJA PARAMETRÓW SZTYWNOŚCI NA BAZIE MONITORINGU*

- Badania na potrzeby grantów badawczych realizowanych w na Wydziale Geologii UW (2005-2011)

W ramach grantów: *Stan skonsolidowania i mikrostruktury glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa-Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. 2008. Projekt Badawczy KBN Nr 4T12B 062 28 oraz Ocena anizotropii struktury i naprężeń efektywnych w ilach mio-plioceńskich z poligonu badawczego „Stegny” w Warszawie. Projekt badawczy KBN Nr 4T12B 030 30*, wykonywałem badania sejsmiczne i ich interpretację. Zlokalizowane były na poligonach eksperymentalnych w Warszawie: „Stegny”, „św. Katarzyna”, „Kiedacza”, „Nowoursynowska”, „Bluszczańska”. Badania w węzłach badawczych miały na celu wieloaspektową analizę właściwości ośrodka gruntowego z użyciem szerokiego wachlarza metod laboratoryjnych i polowych i pozwalały na porównania i weryfikację poszczególnych narzędzi badawczych.

- Badania na potrzeby opracowania projektu prac geologicznych do dokumentacji geologiczno inżynierskiej i dok. geol-inż. dla skoczni narciarskiej K-120 w Wiśle Malince (w ramach jej przebudowy i modernizacji) (autor główny opracowania: prof. dr hab. inż. Lech Wysokiński). Współpraca z ITB.

Badania sejsmiczne wykonywane były na etapie projektowania przez wykonawcę konstrukcji optymalnych metod usunięcia awarii związanej z wystąpieniem osuwiska na zeskoku skoczni w 2006 [1]. Celem badań geofizycznych było głównie nowatorska próba nieinwazyjnej lokalizacji głębokości strefy poślizgu w trudnym terenie wystąpienia osuwiska oraz rozdzielenie profilu na strefy pod kątem stopnia zwietrzenia i sztywności formacji fliszowych. Zbadałem kilkanaście lokalizacji wytypowanych na podstawie morfologicznych elementów osuwiska. Analiza danych oparta była o parametry jakościowe oraz ilościowe. Udało się zlokalizować strefę poślizgu w końcowej strefie osuwiska i rozpoznać miarodajne wartości modułu ścinania w profilu zwietrzelinowym.

- Badania na składowisku popiołów poflotacyjnych elektrowni Bełchatów (2008-2018) - 6 cykli.

Na przestrzeni 10 lat miałem możliwość wykonywać (w ramach współpracy z ITB) badania sejsmikią powierzchniową, na składowisku odpadów paleniskowych elektrowni Bełchatów - Lubień. Zapotrzebowanie wynikało z dokumentacji wykonywanych na potrzeby oceny stateczności skarp składowiska oraz aktualizacji projektu technologii podwyższania obwałowań składowiska. Procedury stosowane do badań tego ekstremalnie zróżnicowanego i nieprzewidywalnego materiału musiały obejmować komplementarne stosowanie wiele metod, w tym sejsmikę powierzchniową. Poligon doświadczalny tego rodzaju (jedyne w swoim rodzaju basen sedymentacyjny) pozwolił mi zebrać unikalne doświadczenia, np. ukazujące efekt gradacji zmian sztywności wraz ze zróżnicowaniem frakcji osadu przy oddalaniu się od obszaru alimentacyjnego.

- Badania na potrzeby budowy/rozbudowy elektrowni (współpraca z ITB):
  - Budowa bloku energetycznego 833MW w Elektrowni Bełchatów (2004)
  - Budowa bloku energetycznego 460MW w Elektrowni Turów (2011)
  - Budowa nowego bloku 2x900MW w PGE Elektrowni Opolo S.A. (2013)

Badania sejsmiczne wykonywane na potrzeby kluczowych inwestycji energetycznych uzupełniały spektrum parametrów rozpoznania podłoża o właściwości związane ze sztywnością i prędkością rozchodzenia się fal sejsmicznych.

- Badania nawiązujące do: Dokumentacji geologiczno inżynierskiej na potrzeby projektowania obwodnicy Iłży (współpraca z ITB)

To przykład wykorzystania nieinwazyjnych badań sejsmicznych SASW/CSWS na potrzeby rozpoznania warunków do projektowania inwestycji liniowej. Zasadniczym elementem tego zadania była jakościowa raczej niż ilościowa ocena sztywności. Jej celem było wyróżnienie stref w profilu podłoża, aby doprecyzować położenie stropu skał starszego podłoża, tym samym określenie miąższości pokrywy osadów czwartorzędowych i silnie zwietrzałych skał starszych.

1. Wysokiński L., Świeca M., 2009. Awaria zeskoku i zabezpieczenie osuwiska w Wiśle Malince. W: Awaryjne budowlane. Zapobieganie. Diagnostyka. Naprawy. Rekonstrukcje. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna: 351-358. Wydaw. Uczel. Zachodniopomorsk. Uniw. Technol., Szczecin.

## 6. Zestawienie dorobku naukowo-badawczo-dydaktycznego

Publikacje, oraz/lub informacje bibliometryczne, są dostępne pod adresami:

[https://www.researchgate.net/profile/Tomasz\\_Szczepanski4](https://www.researchgate.net/profile/Tomasz_Szczepanski4)

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36855698200>

<https://scholar.google.pl/citations?hl=pl&user=OLHRVzoAAAAJ>

<http://www.researcherid.com/rid/C-7847-2016>

| <b>Dorobek naukowo-badawczy</b>                                                                           |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Sumaryczna ilość publikacji naukowych                                                                     | <b>31</b>     |
| Publikacje w czasopismach z listy JCR (lista „A” MNiSW)                                                   | <b>3</b>      |
| Publikacje w czasopismach innych niż z bazy JCR (lista „B” MNiSW)                                         | <b>21</b>     |
| Recenzowane artykuły konferencyjne w języku angielskim                                                    | <b>2</b>      |
| Recenzowane artykuły konferencyjne w języku polskim                                                       | <b>2</b>      |
| Monografie (członek zespołu autorskiego)                                                                  | <b>1</b>      |
| Rozdziały w monografii                                                                                    | <b>3</b>      |
| Sumaryczna liczba punktów wg MNiSW zgodnie z punktacją obowiązującą w roku opublikowania                  | <b>235</b>    |
| Sumaryczny Impact Factor (IF) zgodnie z rokiem opublikowania                                              | <b>2.633</b>  |
| Liczba cytowań wg Web of Science (WoS) łącznie (bez autocytowań)                                          | <b>8(5)</b>   |
| Liczba cytowań wg Scopus łącznie (bez autocytowań)                                                        | <b>22(13)</b> |
| Liczba cytowań wg Google Scholar łącznie                                                                  | <b>125</b>    |
| Liczba cytowań wg Research Gate łącznie                                                                   | <b>30</b>     |
| Indeks Hirscha wg bazy Web of Science (bez autocytowań)                                                   | <b>2(2)</b>   |
| Indeks Hirscha wg bazy Scopus (bez autocytowań)                                                           | <b>3(2)</b>   |
| Indeks Hirscha wg bazy Google Scholar                                                                     | <b>7</b>      |
| Indeks Hirscha wg bazy Research Gate (bez autocytowań)                                                    | <b>4(2)</b>   |
| Udział w projektach badawczych jako wykonawca (Projekty badawcze KBN, MNiSW, NCN i NCBiR)                 | <b>4</b>      |
| Recenzje artykułów naukowych w czasopismach                                                               | <b>2</b>      |
| Promotor pomocniczy w przewodach doktorskich                                                              | <b>3</b>      |
| Promotor lub współpromotor prac magisterskich                                                             | <b>14</b>     |
| Promotor lub współpromotor prac licencjackich                                                             | <b>4</b>      |
| Recenzent prac magisterskich                                                                              | <b>5</b>      |
| Recenzent prac licencjackich                                                                              | <b>2</b>      |
| Liczba godzin ćwiczeń, praktyków oraz wykładów przeprowadzona w latach akademickich 2006/2007 - 2018/2019 | <b>3775</b>   |
| Udział (i wystąpienie) w konferencjach międzynarodowych                                                   | <b>6 (2)</b>  |
| Udział (i wystąpienie) w konferencjach/sympozjach krajowych                                               | <b>14 (8)</b> |
| Wystąpienie zamawiane na konferencji międzynarodowej (krajowej)                                           | <b>1(1)</b>   |
| Udział w komitetach organizacyjnych konferencji                                                           | <b>1</b>      |
| Nagrody za działalność naukową i organizacyjną                                                            | <b>3</b>      |

*Tomasz Szczepanski*