



jakość w budownictwie

**Zakład Geotechniki i  
Fundamentowania**

**Uniwersytet Warszawski**

**Wydział Geologii**

Zakład Geologii Inżynierskiej, Instytut  
Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej



# Metody określania sztywności gruntu w badaniach polowych i laboratoryjnych

*dr inż. Tomasz Godlewski  
dr Tomasz Szczepański*



5. OGÓLNOPOLSKIE SYMPOZJUM  
WSPÓŁCZESNE PROBLEMY  
GEOLOGII INŻYNIERSKIEJ  
W POLSCE

# Plan wystąpienia

## 1. Krótkie wprowadzenie dotyczące metod sejsmicznych wykorzystywanych w geotechnice:

- **podstawy teoretyczne,**
- **przegląd metod,**
- **cel praktyczny i możliwe zastosowania – Przykłady.**

## 2. Metody :

- **prezentacja metod,**
- **porównanie i walidacja na poligonach badawczych,**
- **wpływ metodologii**
- **komplementarność stosowania.**

## 3. Podsumowanie.

# Problem sztywności podłoża

Podłoże  
Konstrukcja

Wymiary elementów

Parametry materiałowe

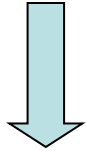


Elementy  
konstrukcji,  
fundamenty

Monitoring

(parametry sprężyste np.  $G_0$  !!!!)

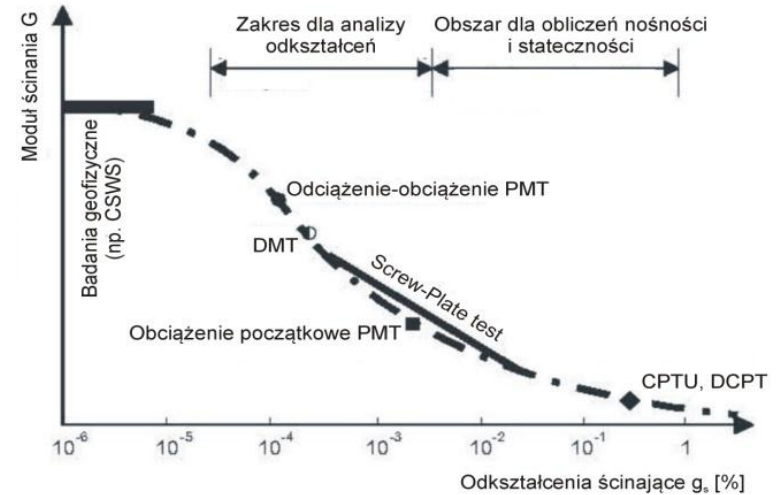
Programy obliczeniowe



Przemieszczenia  
obliczeniowe

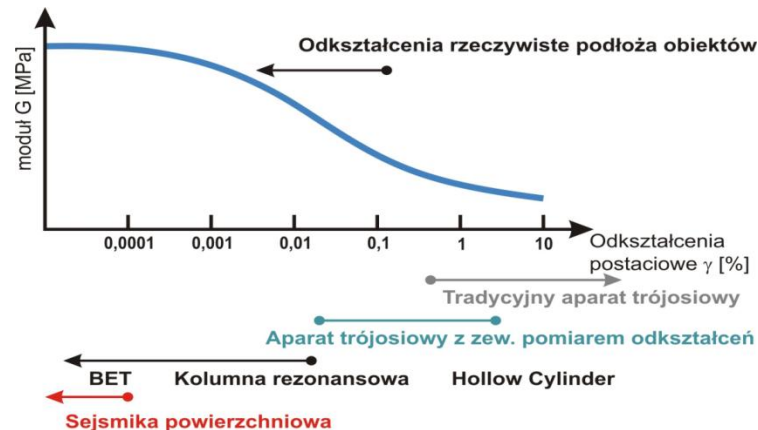


Przemieszczenia  
pomierzone



Poglądowa nieliniowa charakterystyka sztywności w gruntach w zależności od odkształcenia, na tle różnych metod badawczych

Mayne'a i Ishihara, za Atkinsonem – Insitu 2001, Bali



# Podstawy teoretyczne

- Moduł odkształcenia postaciowego  $G_{max}$  (moduł ścinania)

$$G_{max} = \rho V_s^2, \quad [\text{MPa}]$$

- Moduł ściśliwości  $M$

$$M = \rho V_p^2, \quad [\text{MPa}]$$

- Moduł odkształcenia objętościowego  $K$

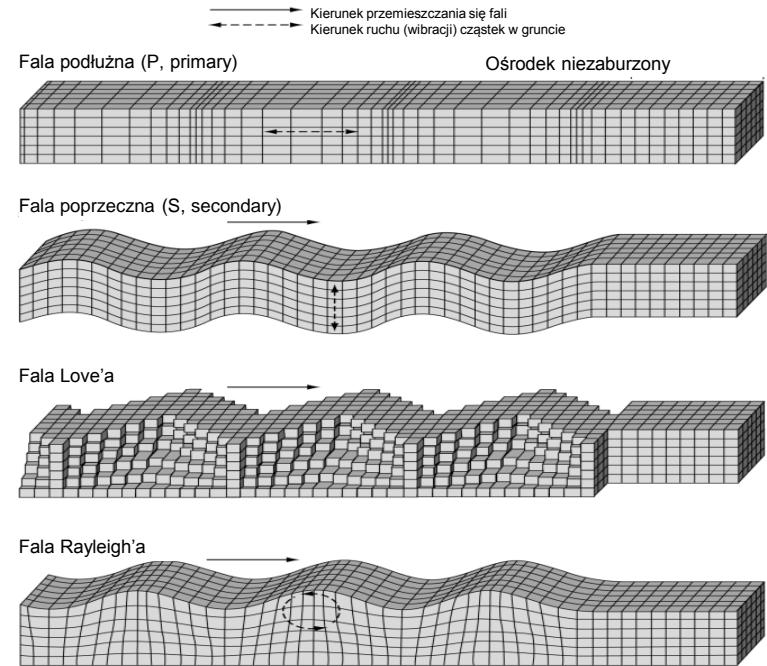
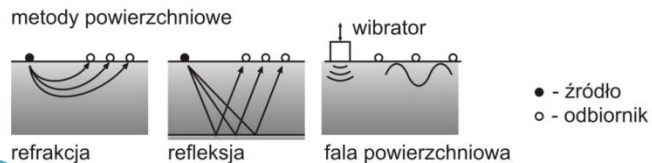
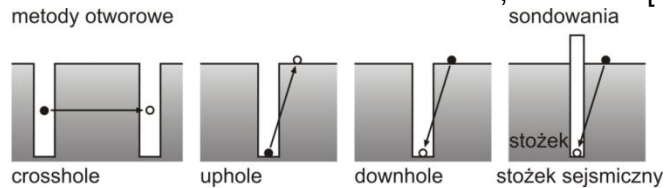
$$K = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right), \quad [\text{MPa}]$$

- Moduł odkształcenia  $E$  (moduł Younga)

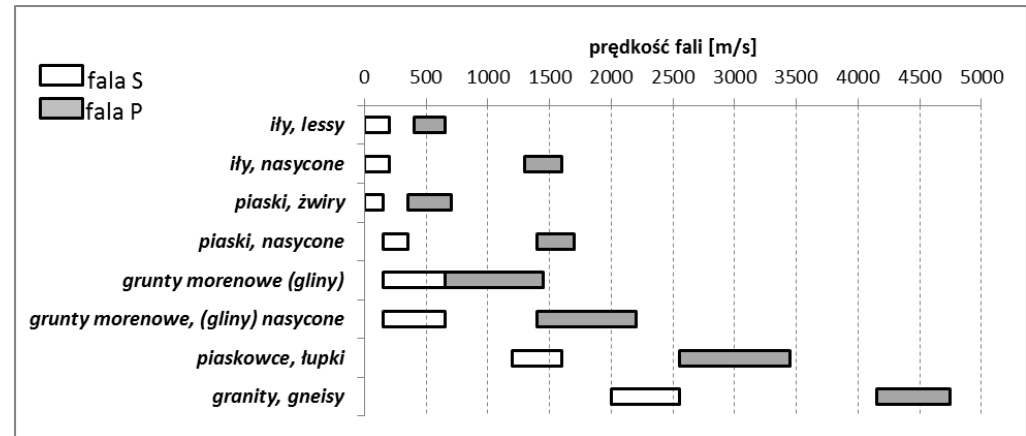
$$E = 2\rho V_s^2 (1 + \nu), \quad [\text{MPa}]$$

- Współczynnik Poissona  $\nu$

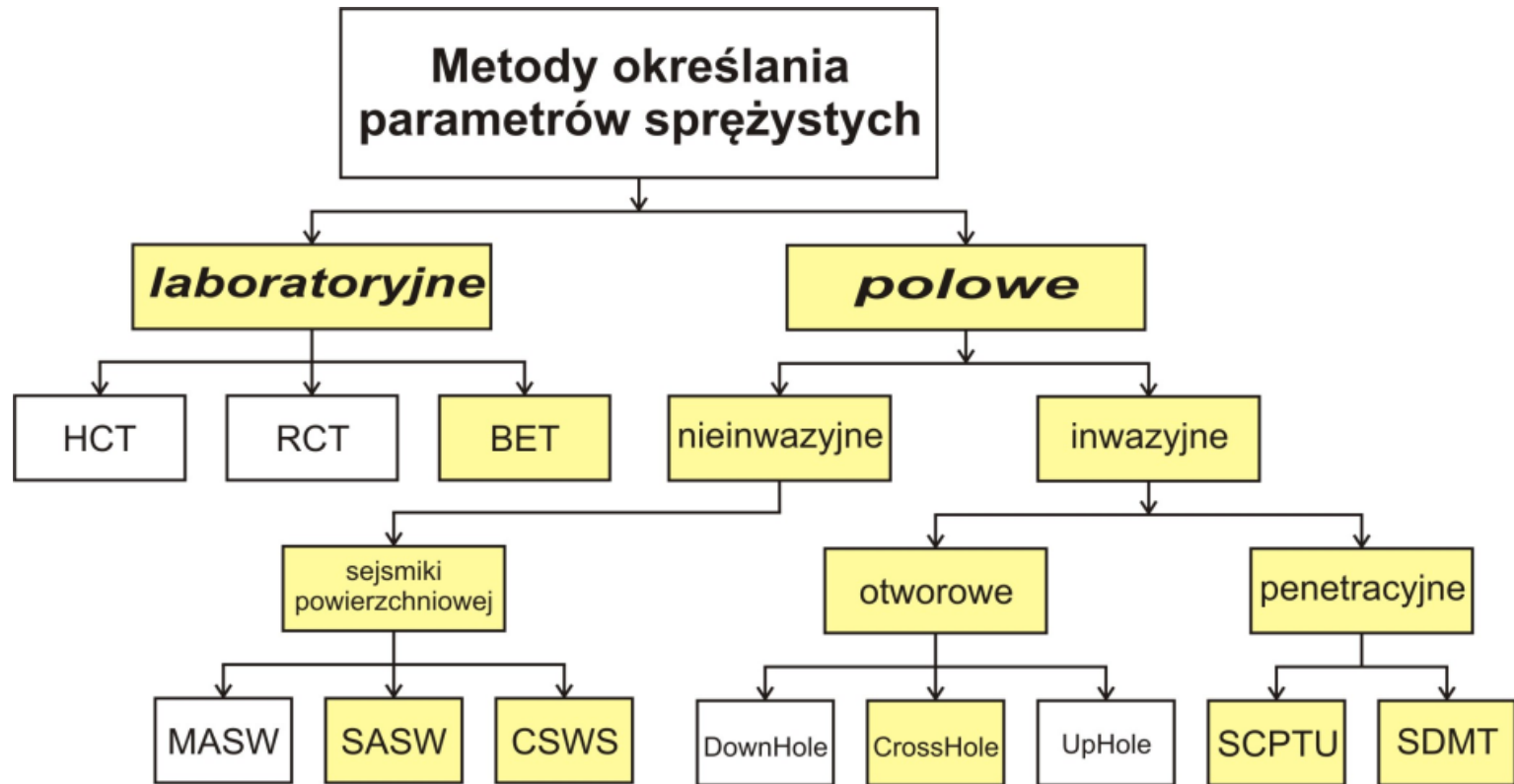
$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}, \quad [-]$$



Modele propagacji fal w zależności od polowej metody sejsmicznej.



# Przegląd metod – metody sejsmiczne



*HCT – aparat „hollow cylinder”*

*BET – „bender element”*

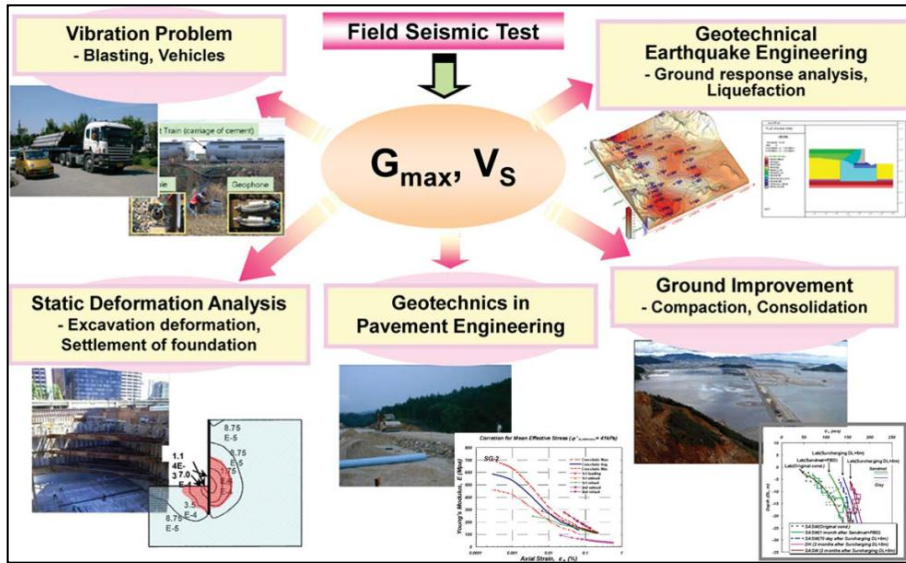
*RC – kolumny rezonansowe*

*SAWS, CSWS, MASW – geofizyka powierzchniowa*

*DH, CH, UH – profilowania w otworach*

*SCPTU, SDMT – sondowania z użyciem końcówek sejsmicznych*

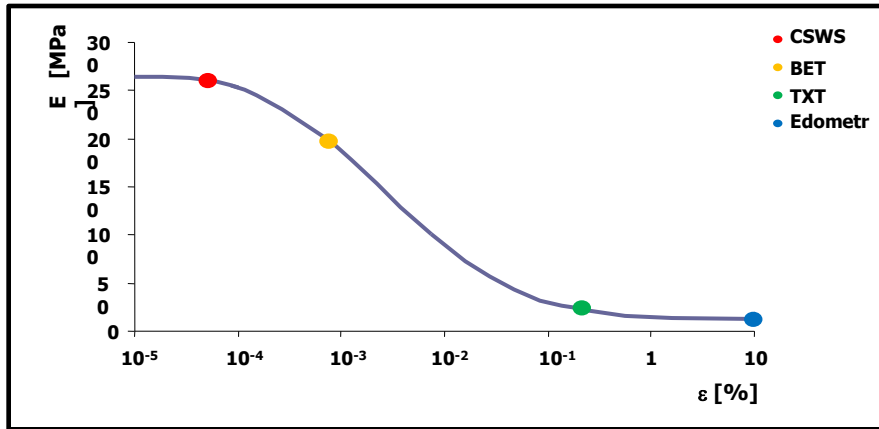
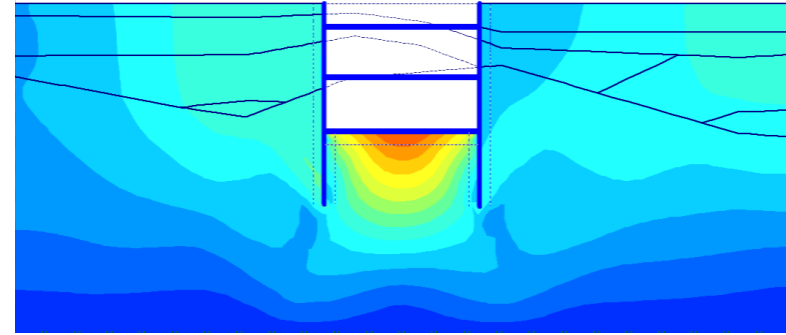
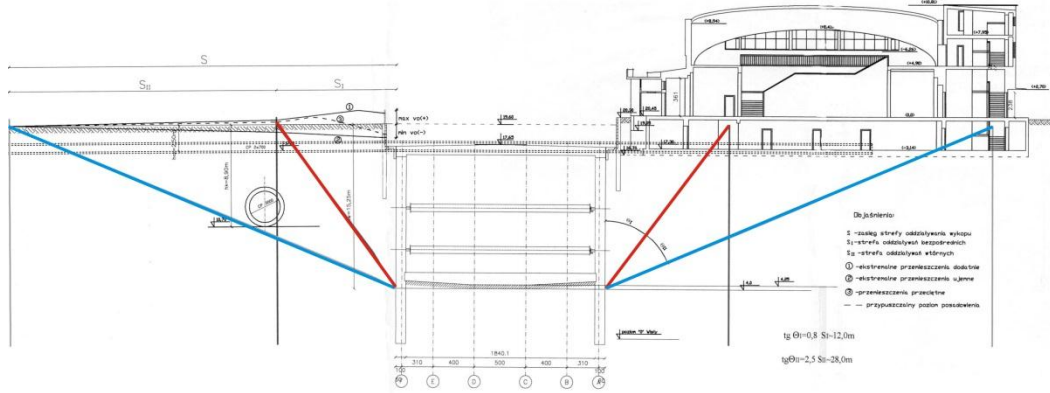
# Zastosowanie w geoinżynierii



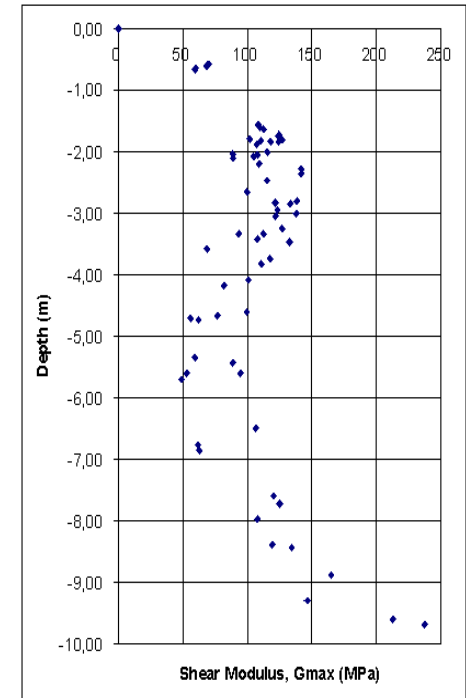
Kim D.S. & all 2012r.

problem geotechniczny	rodzaj podłoża	posadowienie	wykopy	nasypy na gruntach organicznych	prognoza zjawiska upłynnienia	specjalistyczne roboty geotechniczne
„słabe” grunty ilaste		SDMT/CPTU SCPTU/FVT	SDMT/CPTU SCPTU/FVT	SDMT/CPTU SCPTU/FVT	SDMT/CPTU SPT/CH	SDMT/CPTU CH/UH*
„mocne” grunty ilaste		DPSH/PMT DMT/PMT	DMT/PMT	DMT/PMT DPSH/PMT	-	DPSH/PMT CH/UH*
luźne piaski		DMT/SCPTU	DMT/SCPTU	DMT/SCPTU	SDMT/CPTU SPT/CH	SDMT/CPTU
zagęszczone piaski		DMT/PMT	DMT/PMT	DPSH/PMT	-	PMT/Met. Geof.
grunty „scementowane”		DMT/SCPTU DPSH/PMT	SDMT/CPTU SDMT/PMT	DPSH/PMT Lab.	-	BH/ Met. Geof.
rozluźnione nasypy		DMT/PLT DMT/PMT	DMT/PLT DMT/PMT	-	DMT/SCPTU SPT/CH	BH/ Met. Geof.
dobrze zagęszczone nasypy		DPSH/PMT DPSH/PLT	DPSH/PMT	-	-	-
masywy skalne		BH/Lab./Met. Geof.	BH/Lab./Met. Geof.	-	-	BH/Lab./Met. Geof.
masywy skrasowiałe		BH/Lab./Met. Geof.	BH/Lab./Met. Geof.	-	-	BH/Lab./Met. Geof.

# Przykład – głęboki wykop



Moduły odkształcenia dla łąków ze stacji A19

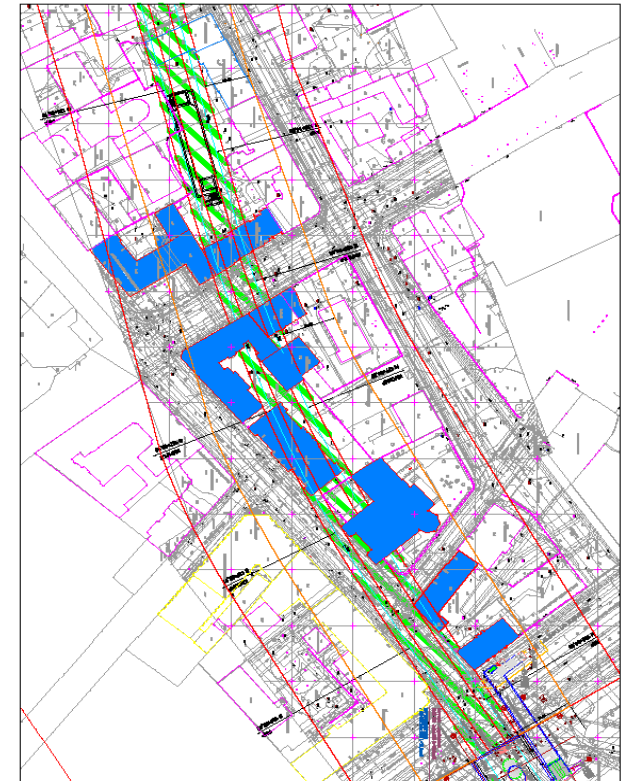
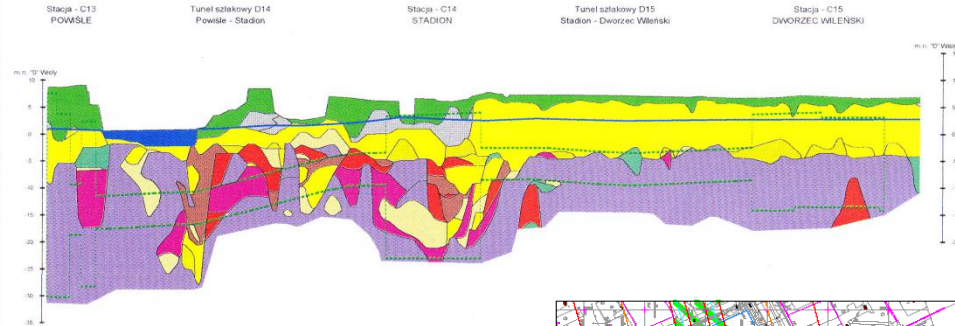
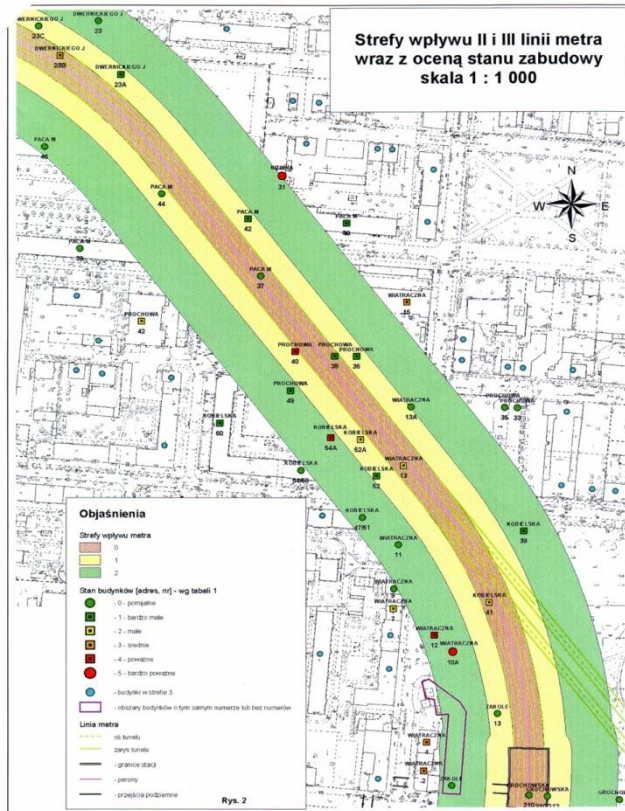


punkty/ położenie	Obliczenia				Pomiar (oś 4-5) ściana W	Pomiar $r$ (oś 4-5) ściana E
	edometr	TRX	BET	CSWS		
A /3,0 m	-8,5 mm	-11,0 mm	3,0 mm	3,3 mm	1 mm	2 mm
B /7,0 m	8,3 mm	6,0 mm	2,2 mm	2,8 mm	3 mm	2 mm
C /12,0 m	47,0 mm	41,0 mm	1,3 mm	1,7 mm	2 mm	1 mm



# Przykład – oddziaływanie II linii metra

## Zasięg stref wpływu II linii metra na zabudowę – fragment z opracowania [NG-903/06]

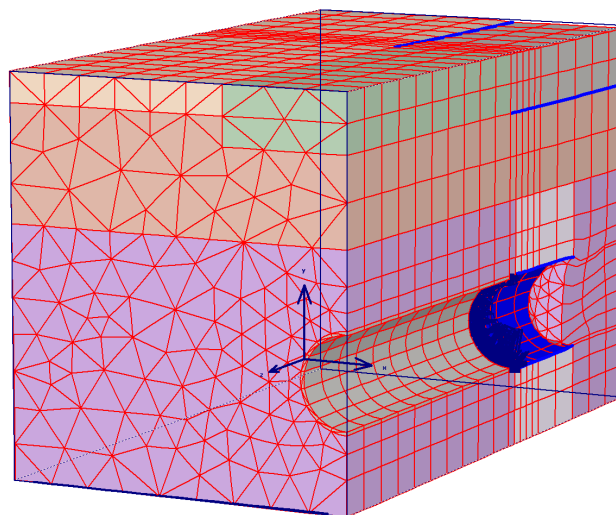
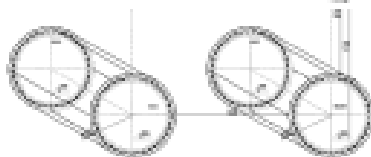
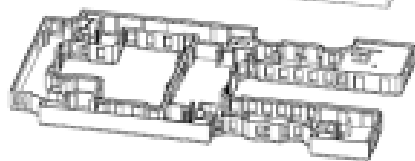


Informacje, wyniki badań i analiz uzyskane w ramach realizacji Projektu badawczego własnego nr R04 002 03: „Nowe technologie projektowania i budowy tuneli oraz wykopów metra z uwzględnieniem dotychczasowych doświadczeń”, sfinansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



# Przykład - drążenie tunelu tarczą TBM

## Budynek nad tunelem metra

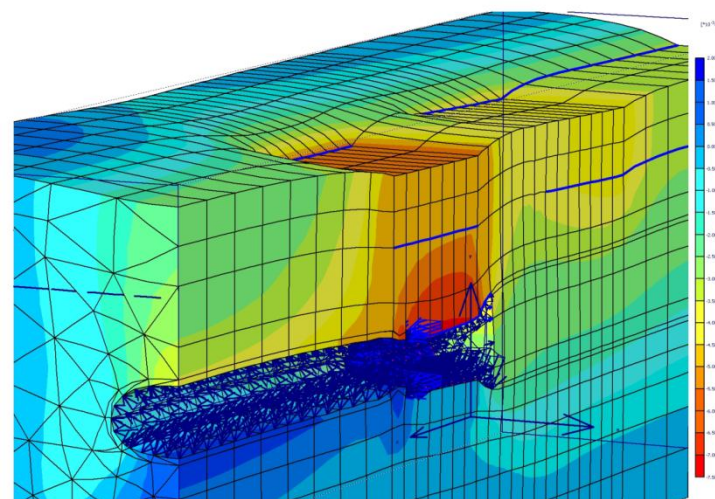


Deformed Mesh  
Extreme total displacement  $45,50 \cdot 10^{-3}$  m  
(displacements scaled up 50,00 times)

*Model z widocznym układem warstw gruntu, położeniem tunelu i zarysem budynku.*

*Model 3D z widocznym układem warstw gruntu i położeniem tunelu, poniżej obraz pionowych przemieszczeń podłoża w trakcie postępu tarczy TBM.*

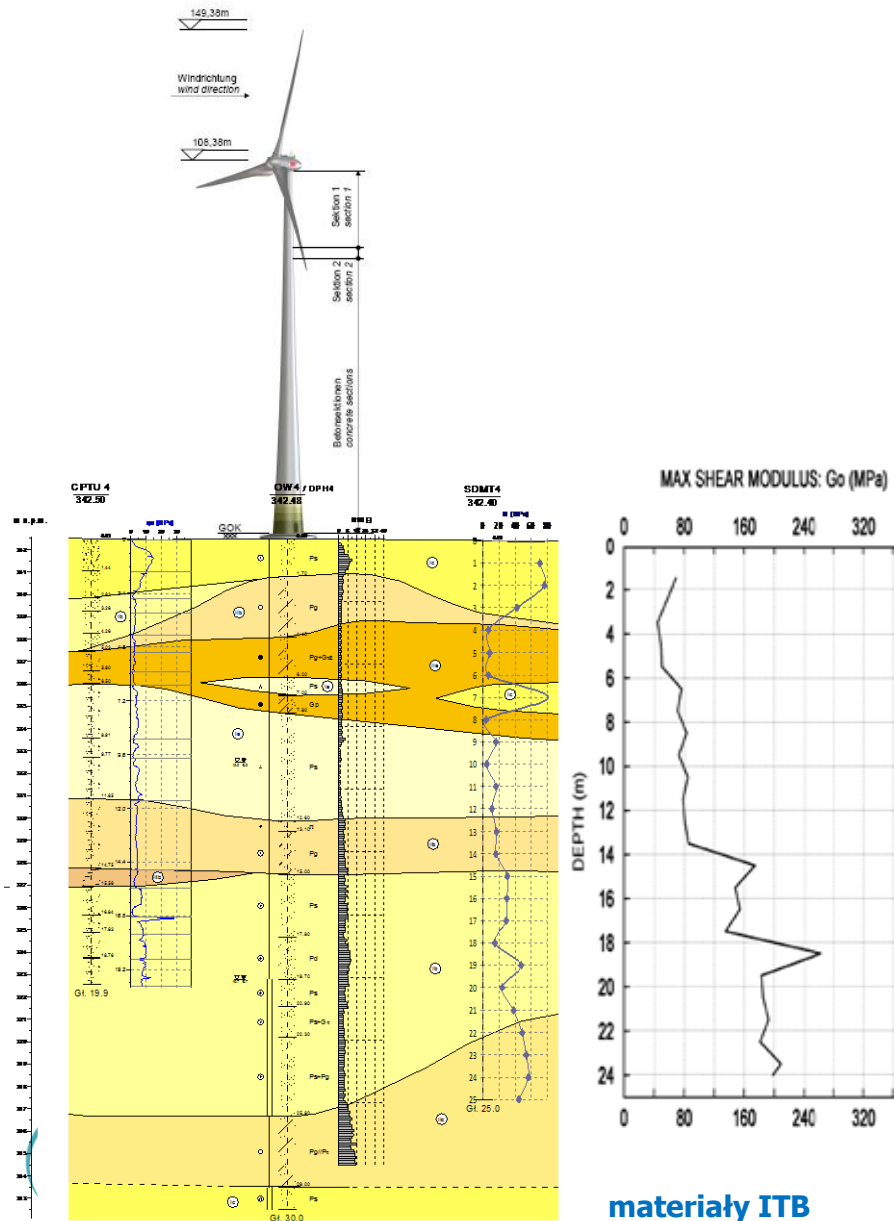
*Kolor pomarańczowy intensywny oznacza osiadanie nad tunelem równe 38 mm. Kolor niebieski pod tunelem oznacza odprężenie gruntu.*



*Obraz przemieszczeń pionowych w rejonie tarczy pod skrzydłami budynku.*

materiały ITB

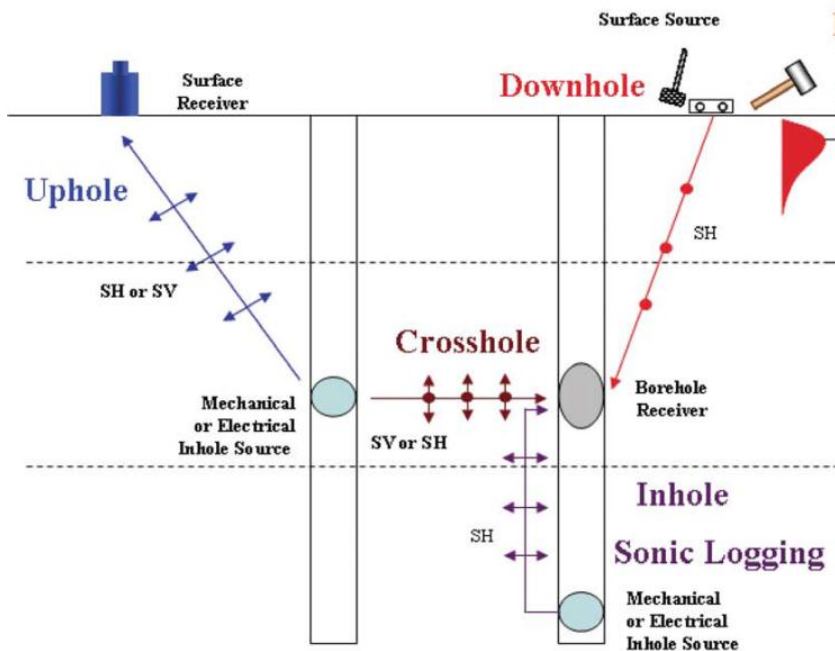
# Przykład - Elektrownie wiatrowe



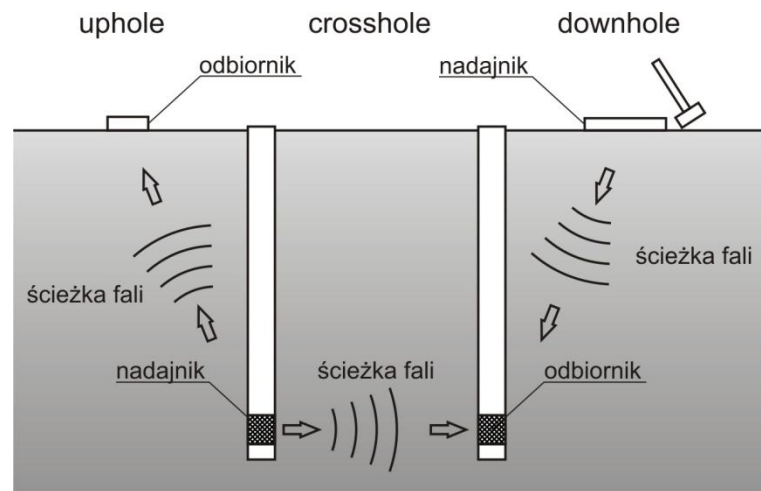
Producenci turbin z uwagi na konieczność uwzględnienia oddziaływań dynamicznych wymagają określenia modułu dynamicznego / *elastic stiffness modulus* / -  $E_{sd}$  [MN/m<sup>2</sup>] oraz wartość współczynnika sztywności skrętniej / *torsional spring stiffness* / -  $k_{\varphi}$  [MNm/rad].

$$k_{\varphi} = \frac{8 * G * r^3}{3 * (1 - \nu)} \quad E_{sd} = k_{\varphi} * \frac{3}{4} * \frac{1}{r^3} * \frac{(1 + \nu) * (1 - \nu)^2}{(1 - \nu - 2\nu^2)}$$

# Metody otworowe CH, DH, UH



Kim D.S. & all 2012r.

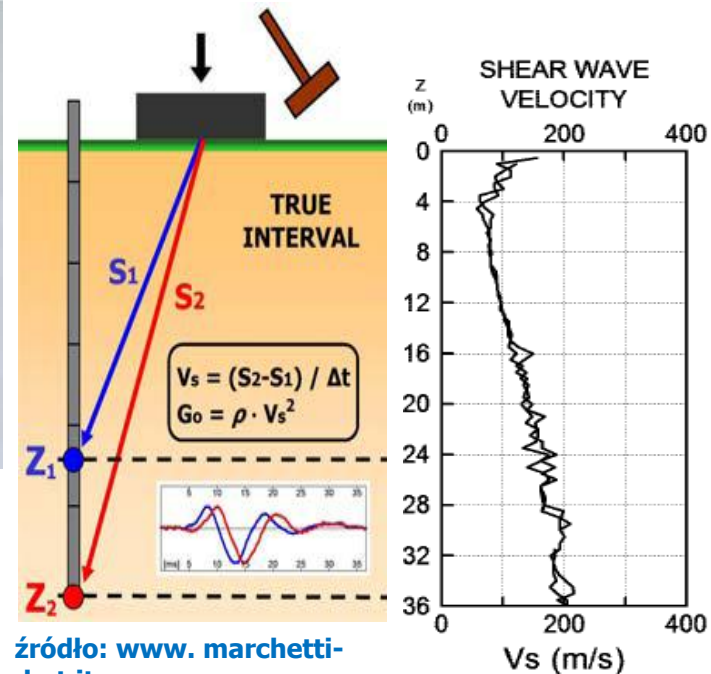




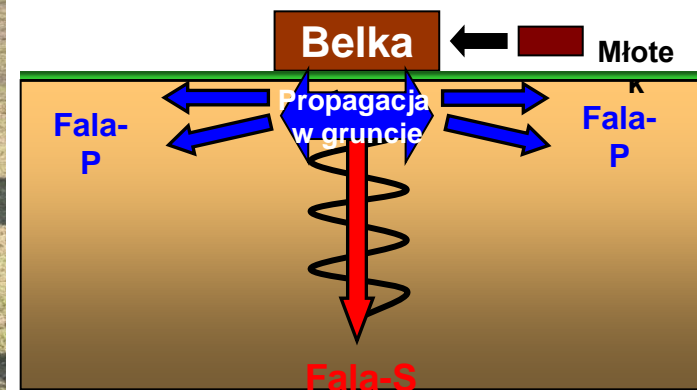
# Sondowania sejsmiczne SCPTU/SDMT



źródło: mat.  
Geotech

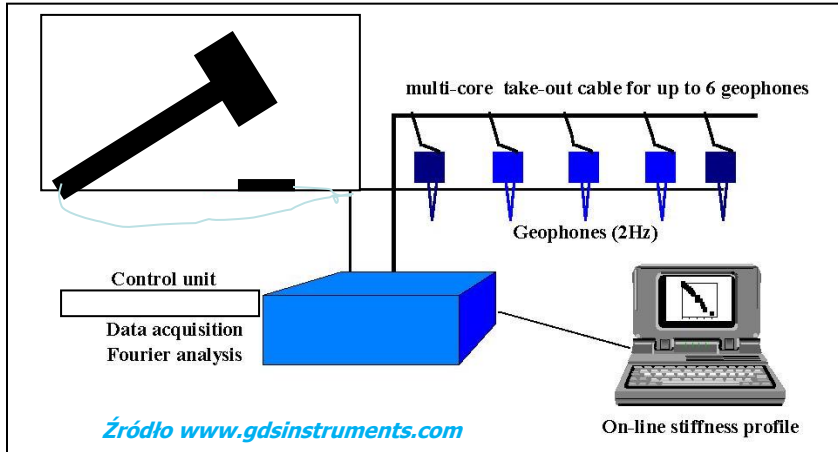


źródło: [www.marchetti-dmt.it](http://www.marchetti-dmt.it)



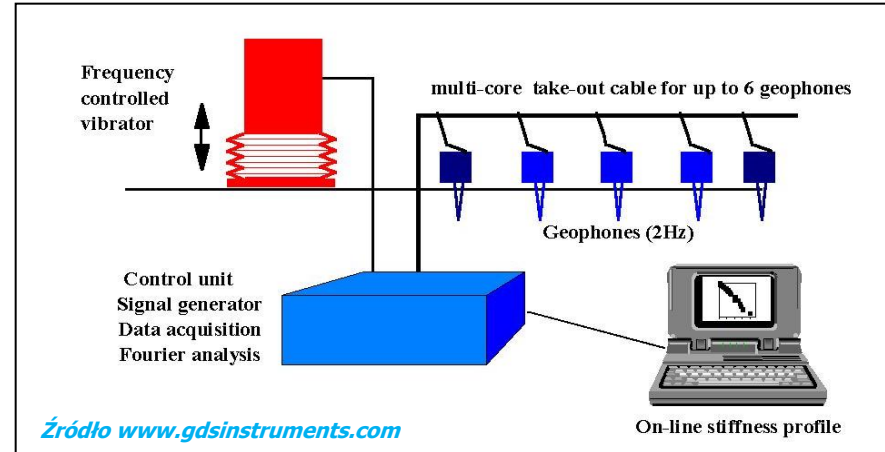
# SASW & CSWS

## SASW Spectral Analysis of Surface Waves



**Źródło drgań – pojedyncze uderzenie młotkiem lub innym obiektem**

## CSWS Continuous Surface Wave System



**Źródło drgań – sterowany komputerowo wibrator (częstotliwości 6-600Hz)**

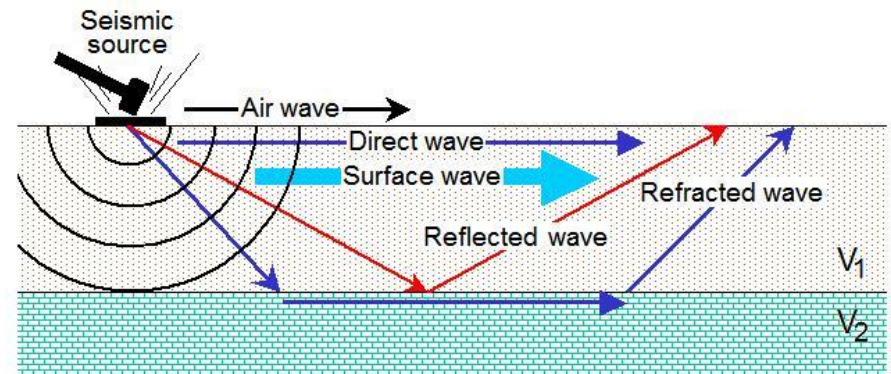




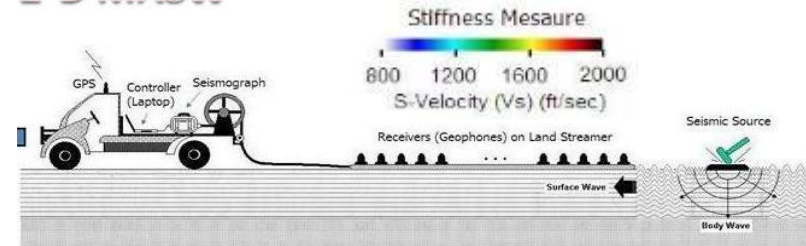
# Metody sejsmiczne

## Metody:

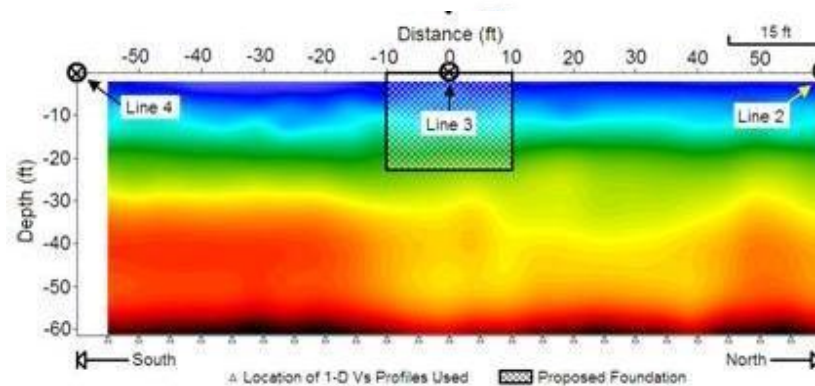
- profilowanie refrakcyjne – wykorzystuje zjawisko rejestracji fal załamanych pod kątem  $90^\circ$  na granicach sejsmicznych – pomiędzy warstwą o niższej prędkości fali od warstwy o większej prędkości leżącej poniżej;
- profilowanie rekleksyjne – polega na wzbudzeniu i rejestracji fal odbitych na granicach ośrodków o różnych gęstościach i prędkościach propagacji fali;
- **Multichannel Analysis of Surface Waves** – rejestracja fal powierzchniowych - rozkład prędkości fali poprzecznej w profilu głębokościowym na podstawie analiz fali Rayleigha.



## 2-D MASW

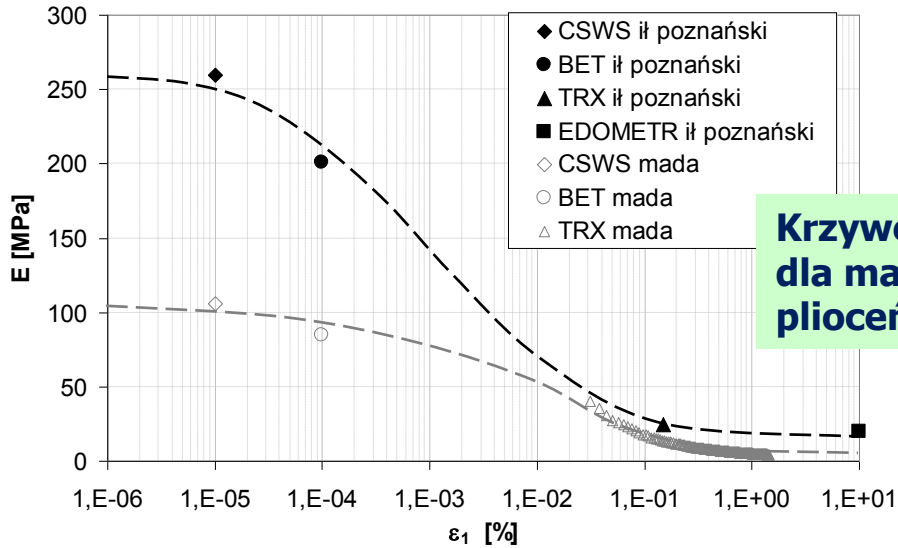


źródło: [www.masw.com](http://www.masw.com)





# Metody laboratoryjne - krzywe sztywności gruntu

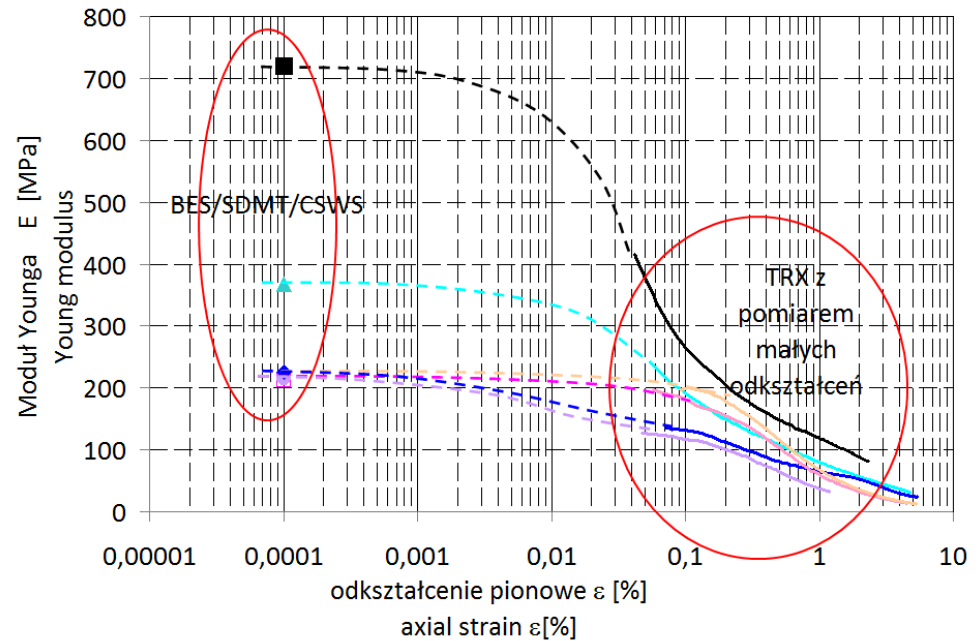


**Krzywe sztywności dla mady i łu mio-  
pliocénskiego**



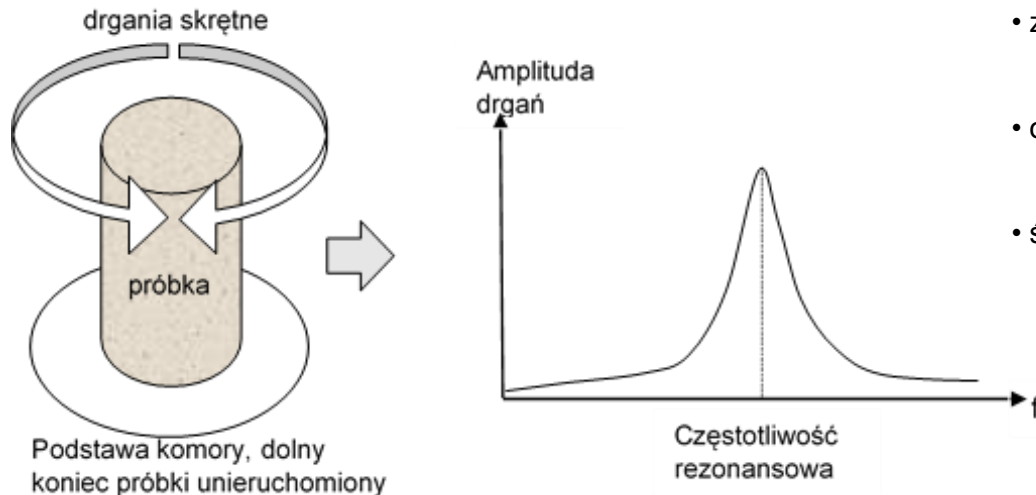
**Przykładowe zróżnicowanie sztywności iłw mio-  
pliocénskich z głębokości 9-14m, z dwóch  
sąsiadujących ze sobą wiercéń na terenie Warszawy**

**Komora TRX z tzw.  
wewnętrznyimi prętami,  
instrumentacja próbki  
czujnikami małych  
odkształceń typu Hall  
Effect (HE)**



# Metody laboratoryjne – RCT, HCT

## Zasada wzbudzenia drgań oraz poglądowy wynik badania RCT.



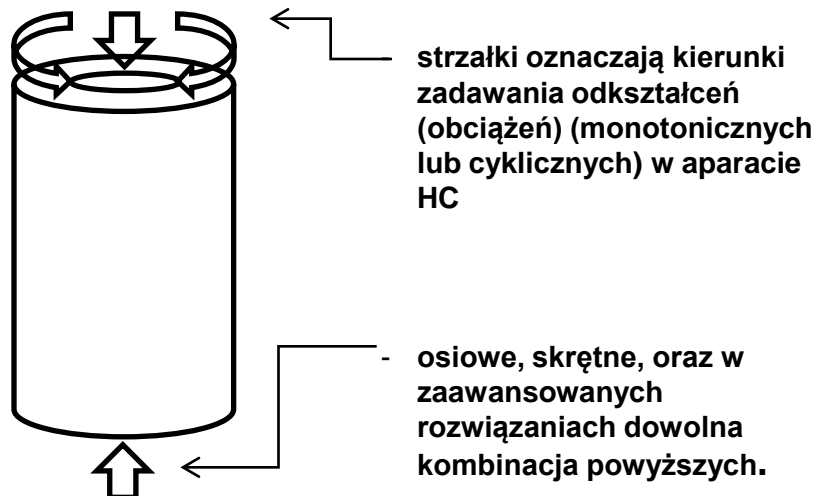
## Możliwości badawcze:

- znajdowanie częstotliwości rezonansowej
  - dla drgań skrętnych
  - dla drgań zginających
- określanie parametrów tłumienia
  - dla drgań skrętnych
  - dla drgań zginających
- ścinanie skrętne

TYP 1. Próbka jest wzbudzana do drgań na dolnym końcu, a na górnym jest mierzona odpowiedź w postaci prędkości, amplitudy lub przyspieszeń drgań

TYP 2. Próbka jest nieruchomo zamocowana na dolnym końcu (koniec pasywny), a na górnym końcu są zarówno zadawane drżania jak i mierzona odpowiedź materiału (koniec aktywny).

## Zasada działania wymuszeń na próbkę w aparacie HC.



## Możliwości badawcze:

- badania zarówno przy dużych, jak i w bardzo małym zakresie odkształceń
- aplikację odkształceń osiowych i skrętnych jednocześnie, zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych obciążeń.
- Możliwość dowolnej zmiany położenia płaszczyzny napreżen głównych

# Poligony badawcze CSWS/SASW vs SDMT

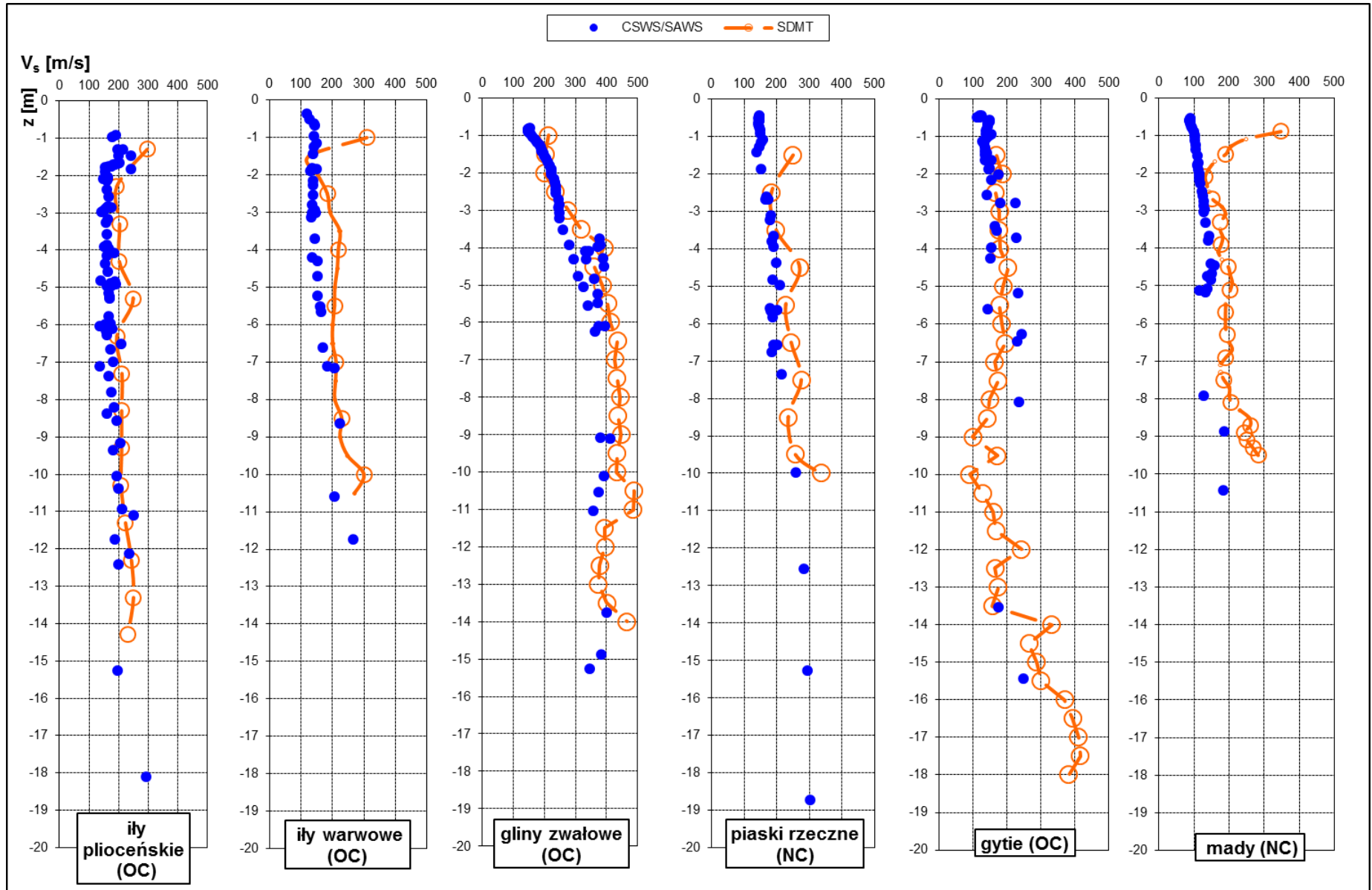
*Wyniki bezpośrednich pomiarów sejsmicznych wykonanie komplementarnie:*

- *6 typów lito-genetycznych*
- *12 poligonów badawczych*
- *ok. 500mb profili*
- *ok. 1200 danych*

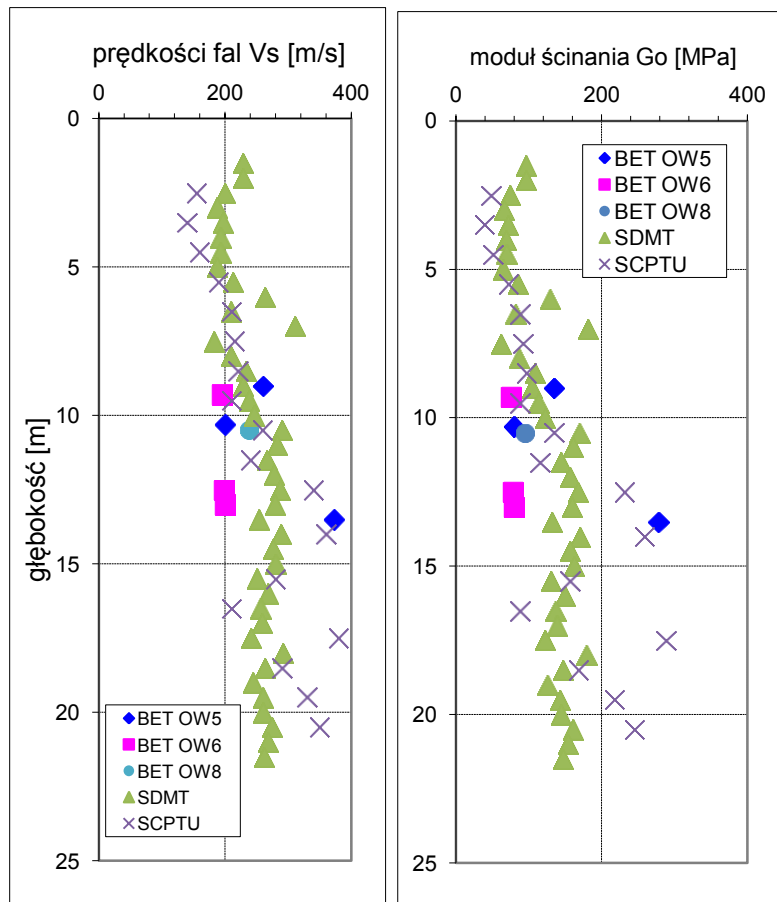




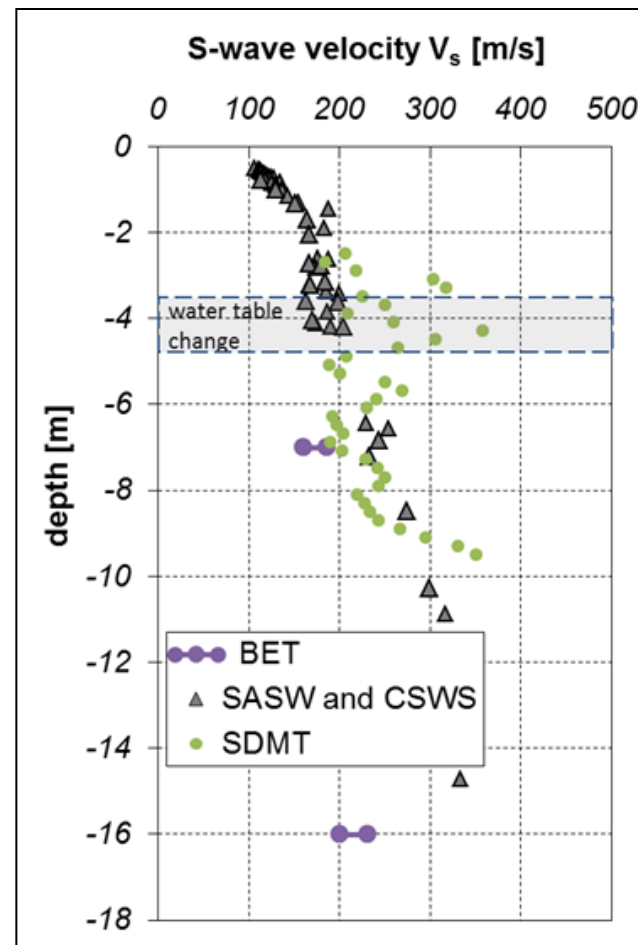
# Porównanie wyników z SDMT i CSWS/SASW dla wybranych typów litogenetycznych gruntów



# Porównanie wyników – walidacja metod



Wyniki pomiarów prędkości fali poprzecznej  $V_s$ , modułu ścinania  $G_0$  i modułu Younga  $E_0$  dla łąw plicieńskich – zestawienie metod laboratoryjnych i polowych.



Wyniki pomiarów prędkości fali poprzecznej  $V_s$  dla piasków rzecznych – zestawienie metod laboratoryjnych i polowych.

Godlewski & Szczepański (2012)

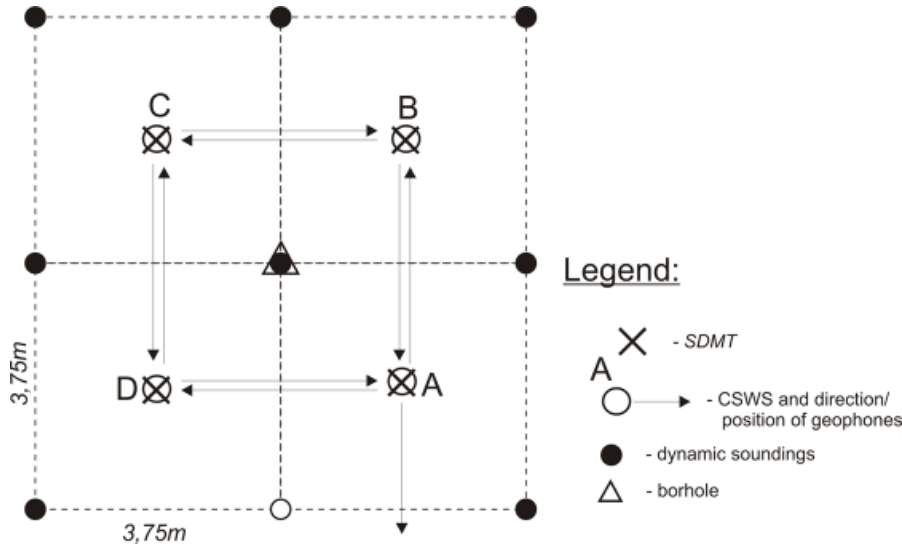
# Poletko doświadczalne

**Powtarzalność wyników i wpływ metodologii na wyniki (praktyczne spojrzenie „od kuchni”):**

- **SASW – CSWS – łączne zastosowanie**
- **SASW / CSWS - wpływ rozstawu geofonów**
- **SDMT – odległość źródła drgań od żerdzi > potencjalna metodyka oceny anizotropii**
- **Wpływ źródła drgań:**

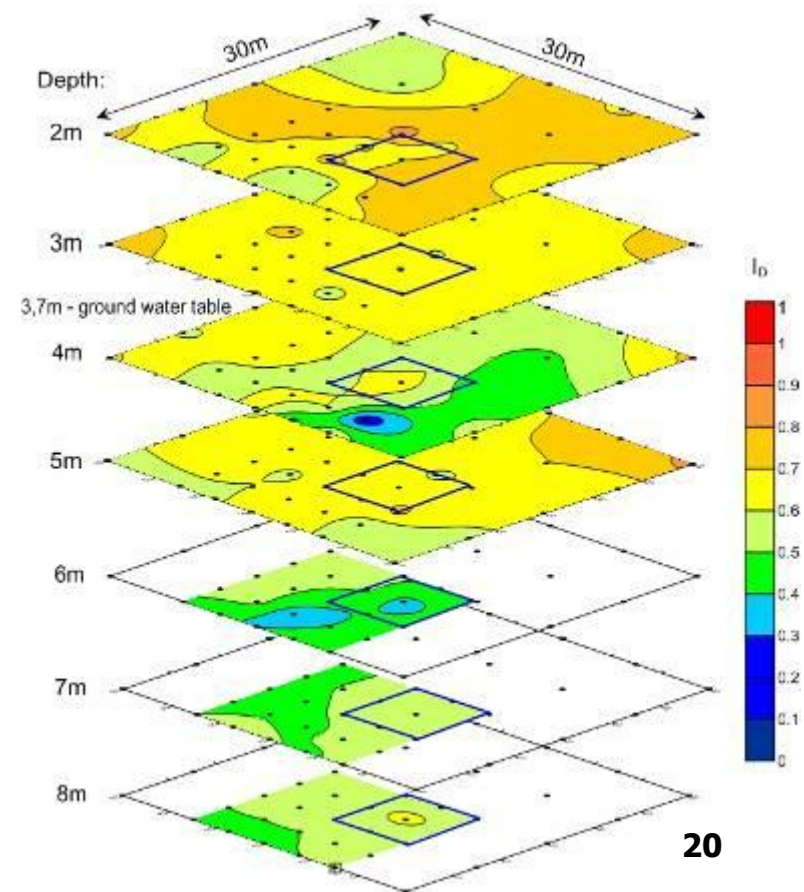
- **SDMT – energia uderzenia młotka,**

- **SASW - użycie różnych obiektów do uderzenia**



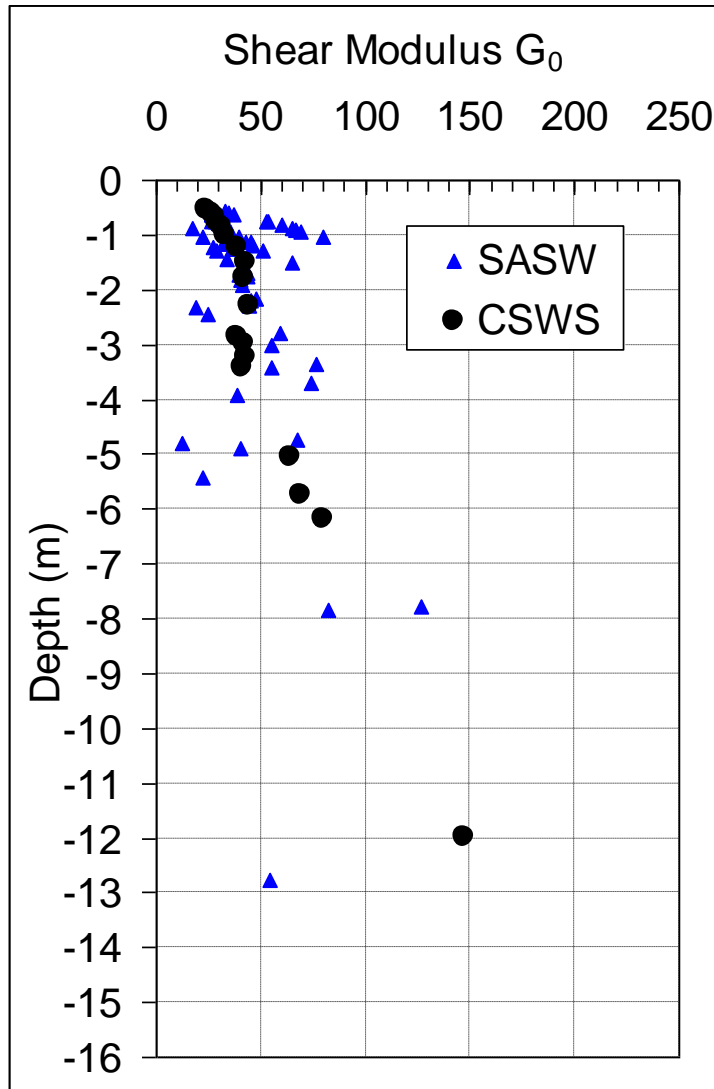
**CSWS – 4 punkty \* 2 kierunki \* 3 rozstawy geofonów (24 testy)**

**SDMT - 4 punkty \* 3 badania\* 3-5 pomiarów na każdej głębokości**

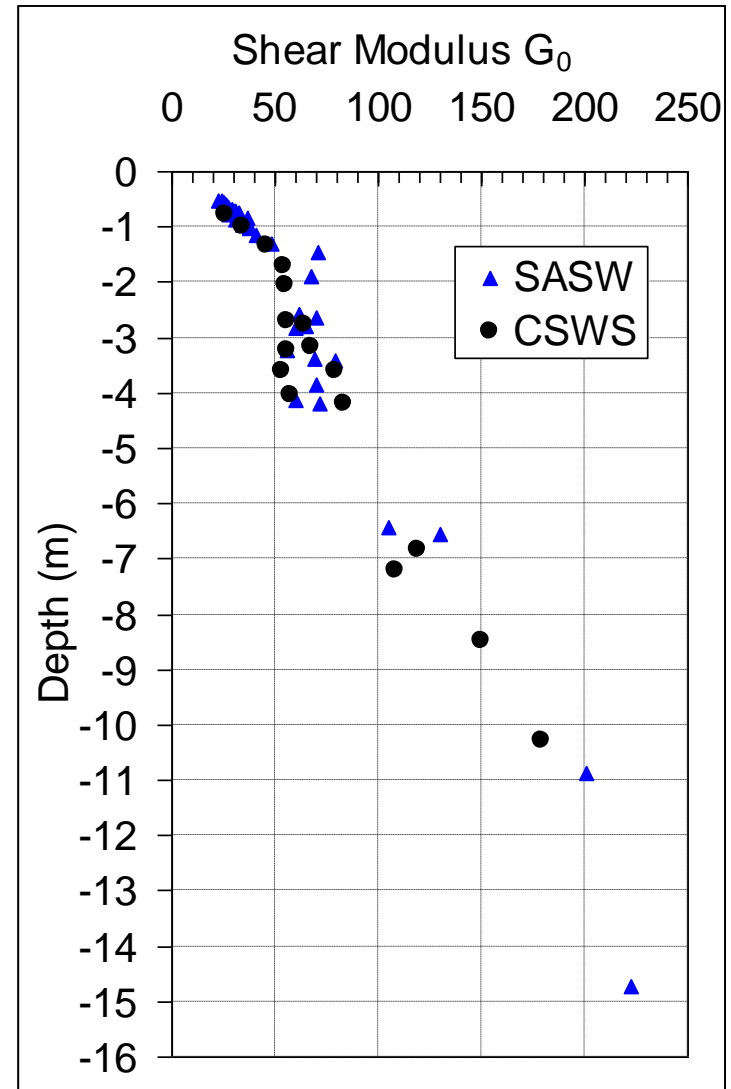




# SASW&CSWS - użycie komplementarne

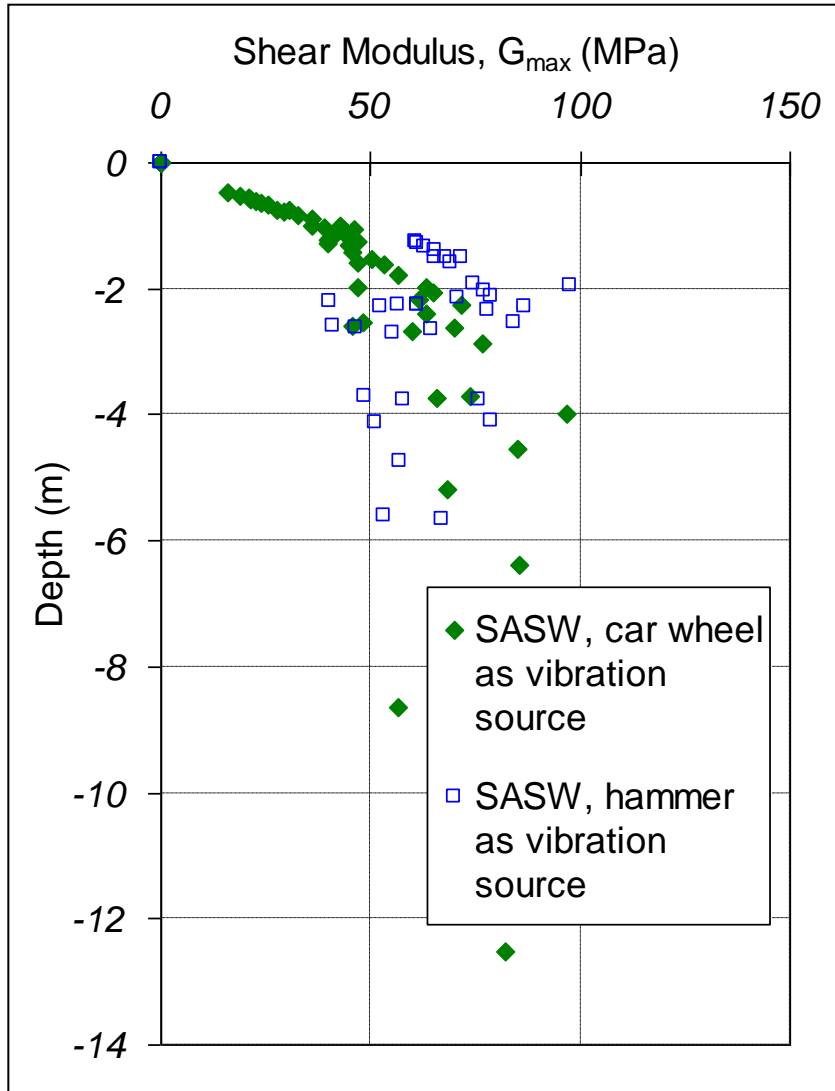


**Badanie przy dużych zakłóceniach**



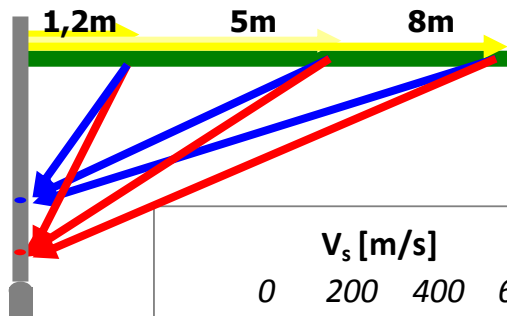
**Badanie przy małych zakłóceniach**

# Wpływ źródła drgań SASW – różne obiekty

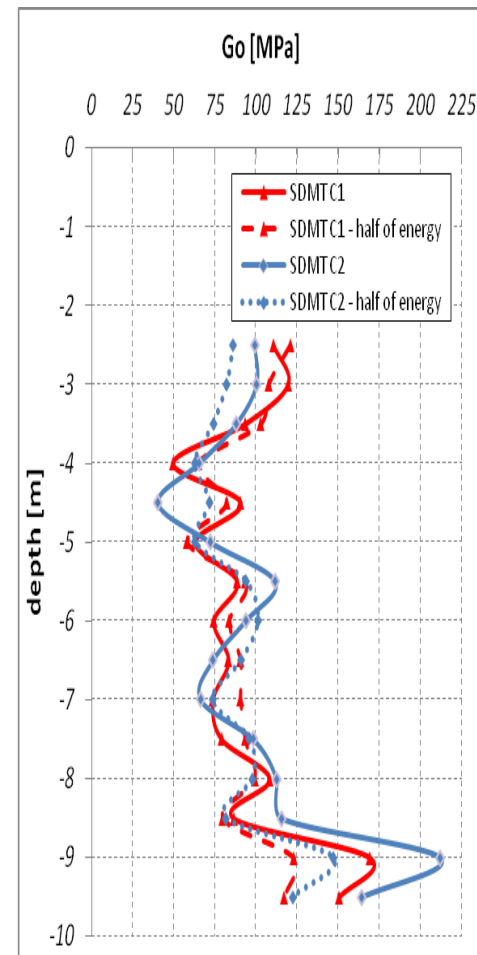
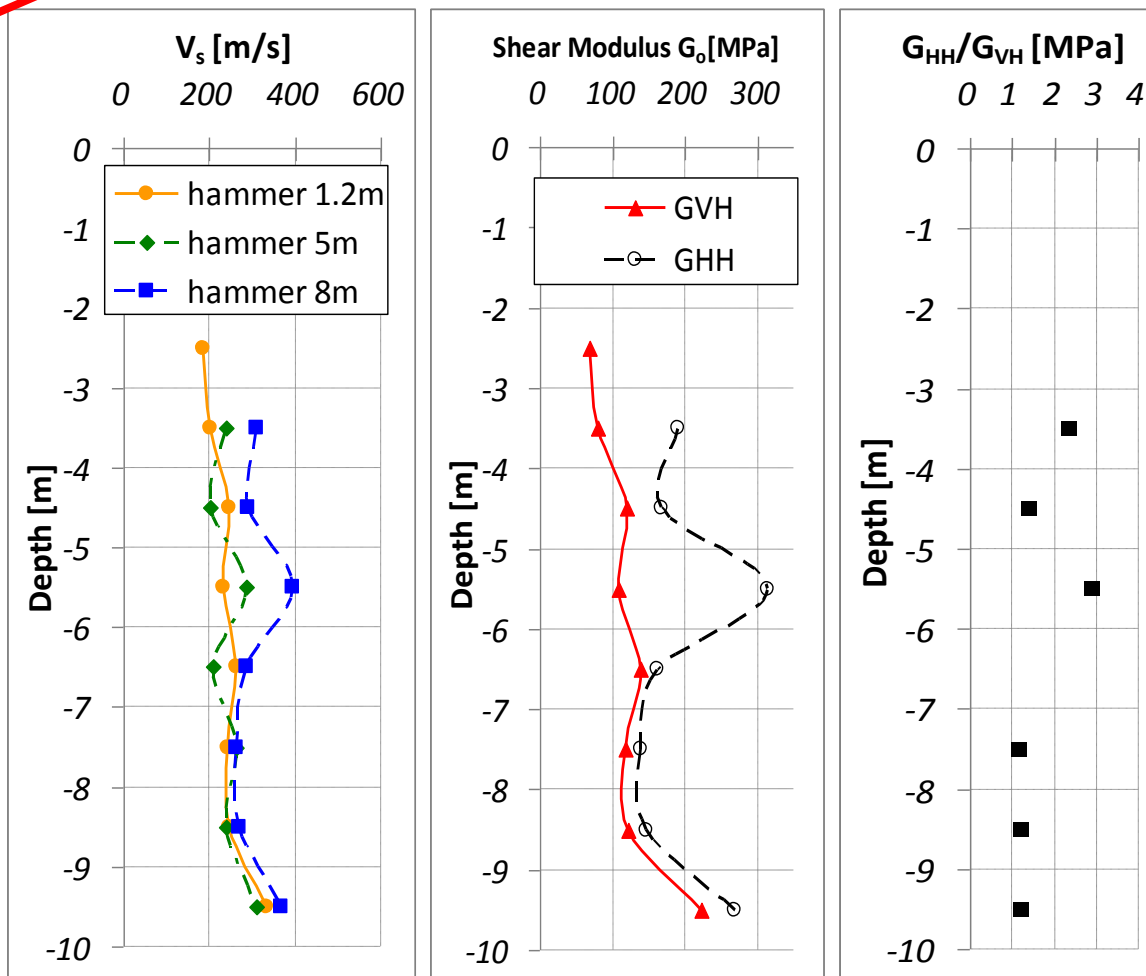


Godlewski & Szczepański (2012)

# SDMT – ocena anizotropii, energetyczność źródła drgań



Procedure according to: Foti, S. & Lancellotta, R. & Marchetti, D. & Monaco, P. & Totani, G. 2006



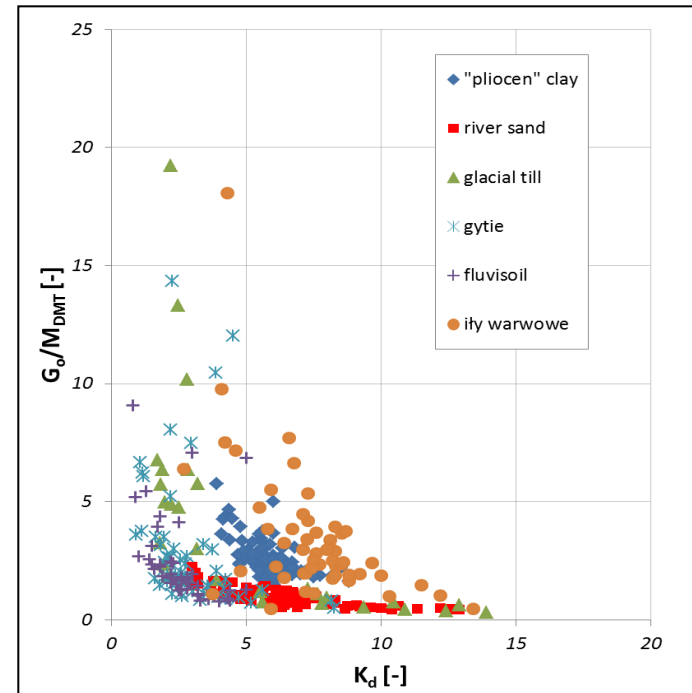
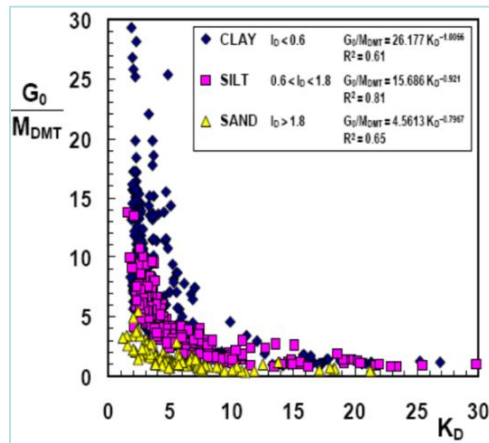
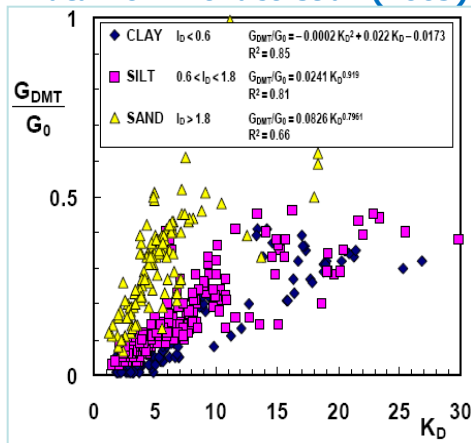
Testowanie wpływu energetyczności źródła na powtarzalność i jakość wyników.

Godlewski & Szczepański (2012)

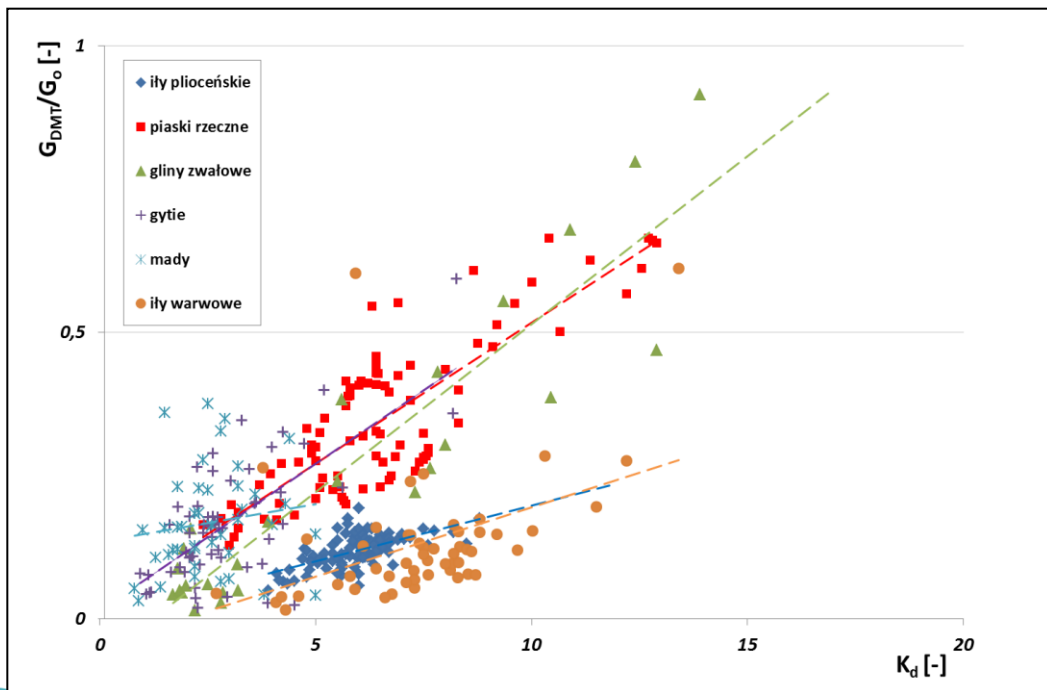
Zmiana odległość źródła drgań od żerdzi jako potencjalna eksperymentalna metodyka do oceny anizotropii gruntu.

# $G_{DMT}/G_0$ ratio

Data from Monaco et al. (2009)

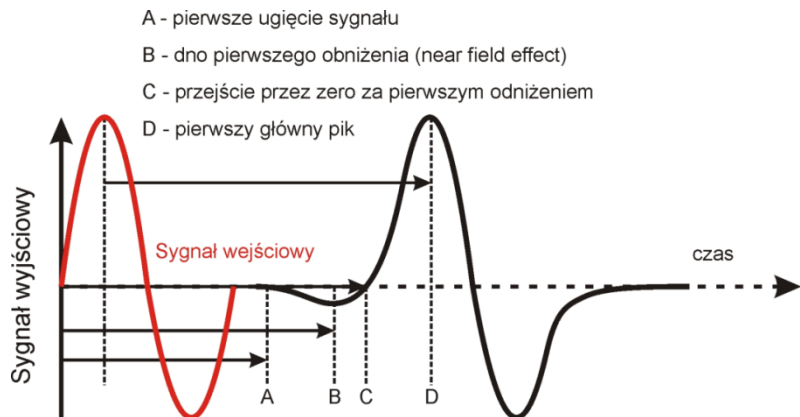


Data from Godlewski & Szczepański (2012)

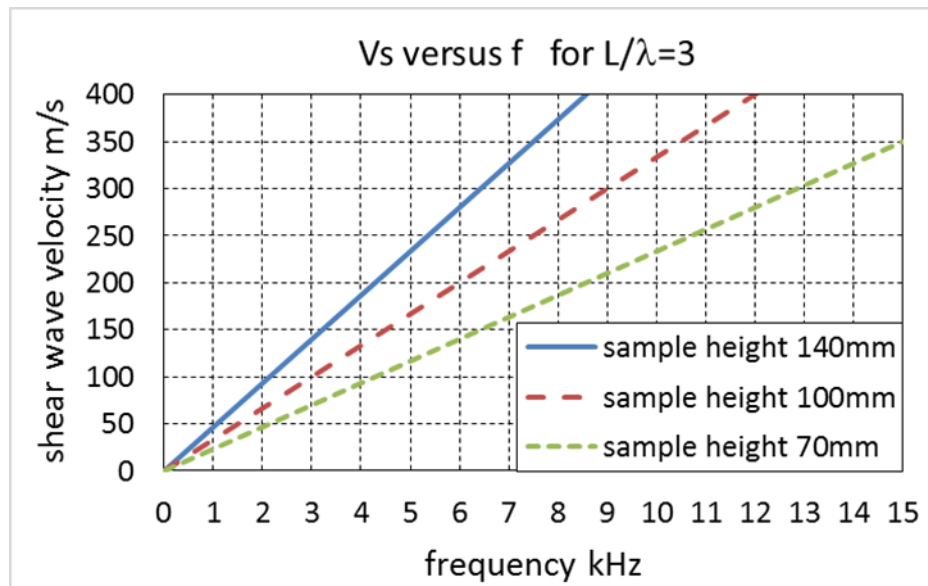


# Interpretacja w metodzie BET – dobór częstotliwości

Metoda obserwacyjna, realizowana w domenie czasu - *Time Domain (TD)*



Schemat typowego przebiegu odbiorczego sygnału fali S z zaznaczonym near field effect (Lee i Santamarina 2005, uzupełniony) [25].



Godlewski & Szczepański (2014)

# Komplementarność stosowania

Metoda Wybrane czynniki	BE (lab)	SDMT	SASW/CSWS
Głębokość badania	<b>Dowolna</b> , zależna tylko od dostępności próbek	Do kilkudziesięciu metrów, ograniczona warunkami podłoża i rodzajem penetrometru (urządzenia wciskającego). Im <b>szywniejsze</b> podłoże tym <b>mniejsza</b> głębokość penetracji.	Do ok. 30m, zależna ściśle od sztywności podłoża i częstotliwości wzbudzonej fali, ew. zakłóceń. Im <b>szywniejsze</b> podłoże tym <b>większa</b> głębokość.
Rozdzielczość (gęstość punktów pomiarowych)	<b>Dowolna</b> , w zależności od potrzeb i ilości próbek. <i>Możliwość wielu oznaczeń dla jednej próbki przy różnych naprężeniach.</i>	Częściowo zdeterminowana odległością geofonów w żerdzi (0,5m), wybierana przez użytkownika. <i>Uzyskana wartość odnosi się do <b>0,5m warstwy</b>.</i>	Zależna od głębokości, rzędu cm w górnej części profilu, do metrów na większych głębokościach, gdzie zaczyna być częściowo losowa. <b>Zróznicowana</b> - <i>zależnie od metody interpretacji i ilości informacji wejściowej.</i>
Charakter badania	<b>Inwazyjny</b> - efekty związane z pobraniem i ekstrakcją próbki – konieczność <b>odtworzenia warunków</b> .	<b>Inwazyjny</b> – warunki <i>in situ</i> , penetracja może powodować <b>efekt wzmocnienia</b> .	<b>Nieinwazyjny</b> – warunki <i>in situ</i> .
Aplikacja	<b>Możliwość modelowania</b> zachowania, dowolny stan naprężeń, anizotropia.	Wszędzie gdzie <b>da się wcisnąć</b> (ale czasem można podwiercić).	Wszędzie, również tam gdzie nic <b>nie da się wcisnąć</b> Stosowalna do oceny trudnych dla metod penetracyjnych podłoży (gliny lodowcowe z głazami, bruki morenowe, zwietrzałe grunty skaliste, nasypy, hałdy etc)
Czas badania	<b>Minuty – godziny</b>	10m profil – <b>1,5÷3 godzin</b>	10m profil – <b>15min - 1 godziny</b>



# Podsumowanie

- 1) Obecnie przy bardzo rozwiniętym warsztacie obliczeniowym problemem są wiarygodne i adekwatne do zadania parametry gruntowe, rozpatrywane w zakresie rzeczywistej pracy konstrukcji. Praktyczne przykłady potwierdzają konieczność wyznaczania **wartości  $G_o$**  dla projektowania obiektów. Wymaga to stosowania wykalibrowanych metod badawczych wykorzystujących **sejsmikę**.
- 2) Wyniki uzyskane na poligonach badawczych wykazały, że obie użyte metody (**SDMT i CSWS/SASW**) dają zbliżone wartości  $V_s \rightarrow G_o$ , co biorąc pod uwagę odmienne warunki badania (inwazyjne - nieinwazyjne) oraz wzajemne uzupełnianie (odmienne ograniczenia i zalety każdej z nich), czyni użytecznym ich **komplementarne stosowanie**.
- 3) Obserwacje uzyskane na poligonie doświadczalnym wskazują na konieczność uwzględniania wpływu różnych **czynników metodycznych** tj. np. dopasowywanie poziomu energii generowanej przez źródło drgań, czy wpływ rozstawu geofonów. Eksperymentowanie z użyciem jako źródła drgań różnych obiektów generujących szerszy zakres częstotliwości fal pozwala na zwiększenie stosowalności (większy zasięg w met. SASW). Jednoczesne stosowanie w pełni kontrolowanego źródła drgań (wibrator w wersji CSWS) daje dodatkowe korzyści związane z interpretacją wyników uzyskanych w warunkach silnych zakłóceń (instalację przemysłowe, przestrzeń miejska, warunki na budowie).

# Podsumowanie cd.

## 4) Efektywne stosowanie przedstawionych metod wymaga:

- dokonania właściwego wyboru metod do określonego zadania - **ADEKWATNOŚĆ**;
- stosowanie łącznie różnych metod i technik pomiarowych w celu zwiększenia skuteczności - **KOMPLEMENTARNOŚĆ**;
- kalibrowania i potwierdzania uzyskiwanych wyników z informacją z wierceń/sondowań, w celu poprawnej interpretacji otrzymanego obrazu/modelu geofizycznego – **DOŚWIADCZENIE**.

***INSTRUKCJA DOTYCZĄCA OKREŚLANIA MODUŁU  $G_0$  W BADANIACH  
LABORATORYJNYCH I POLOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD SEJSMICZNYCH -  
Projekt Badawczy (NG-61) w ITB we współpracy z IHiGI Wydziału Geologii UW –  
planowane wydanie - styczeń 2015r.***

**Instytut Techniki Budowlanej**  
**Zakład Geotechniki i Fundamentowania**

ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa

Tel. +48 22 848 86 68

+48 22 56 64 291

Fax. +48 22 56 64 258

e-mail: [geotechnika@itb.pl](mailto:geotechnika@itb.pl)

[www.itb.pl](http://www.itb.pl)

***DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ!!!***

**Wydział Geologii Uniwersytet Warszawski**

**Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej**

ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

Tel. +48 22 55 40 500

Fax. +48 22 55 40 001

e-mail: [ihigi.geol@uw.edu.pl](mailto:ihigi.geol@uw.edu.pl)

[www.geo.uw.edu.pl](http://www.geo.uw.edu.pl)