



Walidacja prędkości fal sejsmicznych P-S w wybranych rodzajach gruntu. Analiza porównawcza wybranych metod badawczych

Aneta Horbowicz

Adam Popławski

Katarzyna Boniewska

Szymon Zaręba

Marta Sokołowska

Plan prezentacji

- ▶ 1. Cel projektu
- ▶ 2. Czym są fale sejsmiczne?
- ▶ 3. Zastosowane metody badań
- ▶ 4. Lokalizacja i opis węzłów badawczych
- ▶ 5. Porównanie metod badawczych
- ▶ 6. Wnioski
- ▶ 7. Co dalej?

Literatura

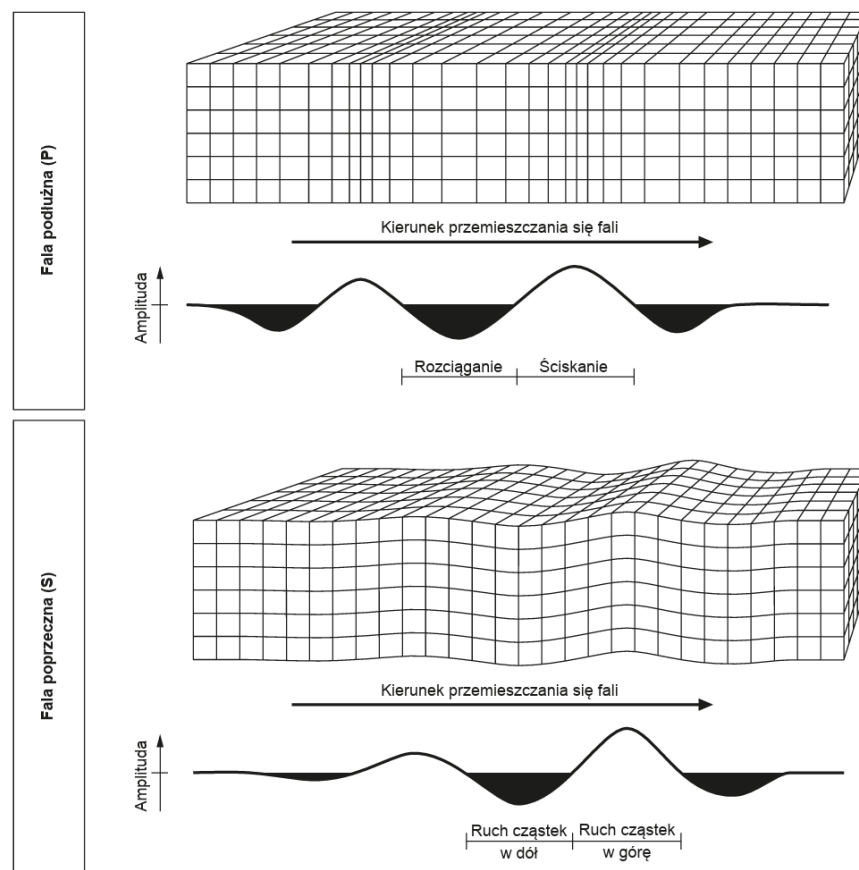
- Amoroso S., Monaco P., Lehan B.M., Marchetti D., 2014, Examination of the Potential of the Seismic Dilatometer (SDMT) to Estimate In Situ Stiffness Decay Curves in Various Soil Types, *Soils and Rocks*, 37, 3 : 177-194. ABMS and SPG. São Paulo, Brazil
- Anderson N., Thitimakorn T., Hoffman D., Stephenson R., Luna R., 2007, A Comparison of Four Geophysical Methods for Determining the Shear Wave Velocity of Soils, *Environmental & Engineering Geoscience* vol. 13, p. 11-23
- Bajda. M., Markowska-Lech K., Lech M., Skutnik Z., 2016, Terenowe badania sejsmiczne w praktyce geotechnicznej, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, nr 93, s. 95-108
- Godlewski T., Szczepański T., 2015, *Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych*, Warszawa, Instytut Techniki Budowlanej
- Long M., Wood T., L'Heureux J.S., 2017, Relationships Between Shear Wave Velocity and Geotechnical Parameters for Norwegian and Swedish Sensitive Clays, *Landslides in Sensitive Clays* p. 67–76
- Marchetti D., 2019, Applications and Recent Developments of the Flat Dilatometer (DMT) and Seismic Dilatometer (SDMT), 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
- Markowska – Lech K., 2006 *Przegląd metod wyznaczania modułu ścinania (G_0) z badań terenowych i laboratoryjnych na przykładzie ilów płoceńskich*, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* vol. 15, p.75-84
- Mayne P.W., 2005, *Integrated ground behavior: in-situ and labs tests*, *Deformation Characteristics of Geomaterials*
- Mayne P.W., Cargill E., Greig J., 2023, *The Cone Penetration Test: Better information better decisions*
- Ostrowski, S., Pacanowski, G., Majer, E., Sokołowska, M. 2023: *Badania geologiczno-inżynierskie. Geofizyka Inżynierska. Państwowy Instytut Geologiczny PIB, Warszawa*
- Rose H., Graham C., Paul W., Simon G., Ian J. and Róisín B. „Towards the development of a standard for the PS suspension logger”. *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization Barcelona*, 18 - 21 June 2024
- Valvano Ch., Amorosso S., Hailemikael S., Minarelli L., 2025, *Use of in situ tests to measure and predict shear wave velocity: the peculiarity of silty-sandy deposits in Emilia (Italy)*, *Annals of geophysics = Annali di geofisica* 68(3):NS339

Cel projektu

- ▶ Porównanie metod badawczych pod kątem:
 - wiarygodności uzyskiwanych wyników,
 - stopnia skomplikowania wykonania i interpretacji badań,
 - potencjalnych możliwości zastosowania tych metod w praktyce inżynierskiej.
- ▶ Wykrycie rozbieżności między metodami.
- ▶ Oznaczenie parametrów geotechnicznych:
 - **moduł ścinania (G_0)** - odpowiadający sztywności gruntu w zakresie **małych odkształceń** (ang. *small-strain stiffness*), który jest kluczowy przy analizach dynamicznych, ocenie podatności na wibracje, prognozowaniu osiadań czy analizach przemieszczeń,
 - **moduł Younga (E)** - przydatne w modelowaniu zachowania gruntu pod obciążeniami statycznymi i dynamicznymi,
 - **współczynnik Poissona (ν)** - umożliwiający ocenę sprężystego zachowania ośrodka,

Czym są fale sejsmiczne?

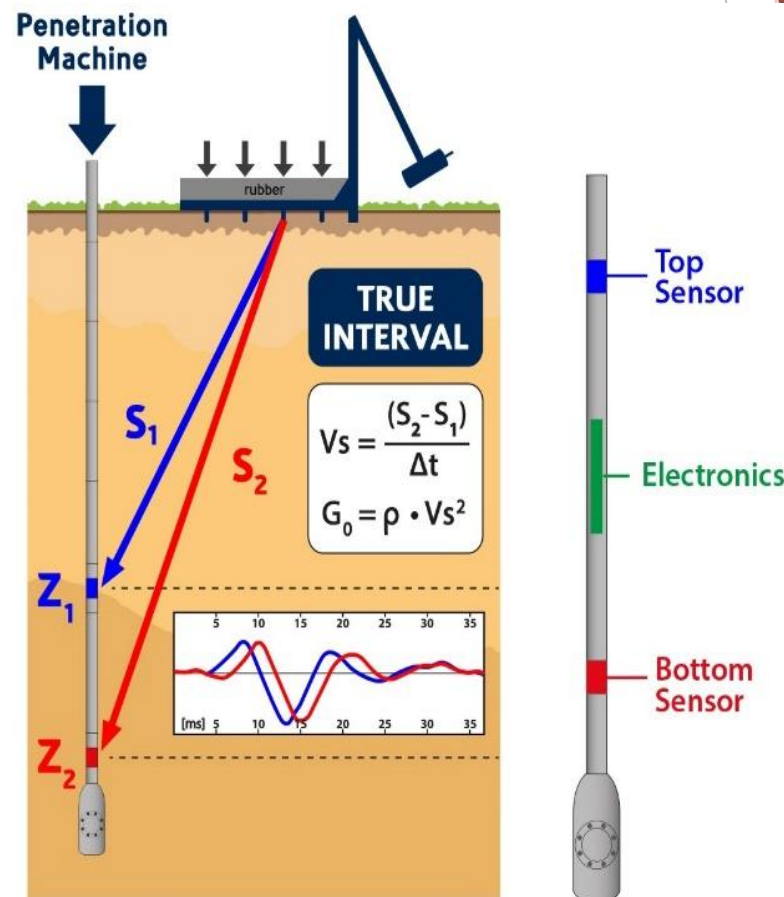
- ▶ Odkształcenia sprężyste rozchodzą się na dwa sposoby.
- ▶ **Fala S (fala poprzeczna, ang. *shear wave*)** - front odkształceń rozprzestrzenia się prostopadle do drgań cząsteczek ośrodka; dochodzi do cyklicznych odkształceń ścinających.
- ▶ **Fala P (fala podłużna, ang. *compressional wave, longitudinal wave*)** - front odkształcenia przemieszcza się równoległe do kierunku drgań cząsteczek ośrodka - dochodzi do cyklicznego ściskania i rozciągania ośrodka.



Zastosowane metody badawcze

► SDMT

- Pomiar sejsmiczny w trakcie standardowego badania DMT.
- Testy w systemie odcinkowym, w odstępach ok. 0,5÷1,0 m.
- Analiza czasu przejścia fal bezpośrednio z punktu strzałowego do punktu odbioru lub na określonym odcinku, między dwoma odbiornikami.
- Odbiornik lub zestaw odbiorników zainstalowany w końcówce sondy.
- Rejestracja fal docierających przez pionową kolumnę gruntów i przekazanie sygnału na powierzchnię, do specjalnego komputera.
- Wyznaczenie opóźnienia pomiędzy generacją sygnału a jego dotarciem na znaną głębokość pozwala na wyznaczenie średniej prędkości fal sejsmicznych w kolumnie gruntu.
- W dalszych transformacjach wyznaczany jest moduł ścinania G_0 .

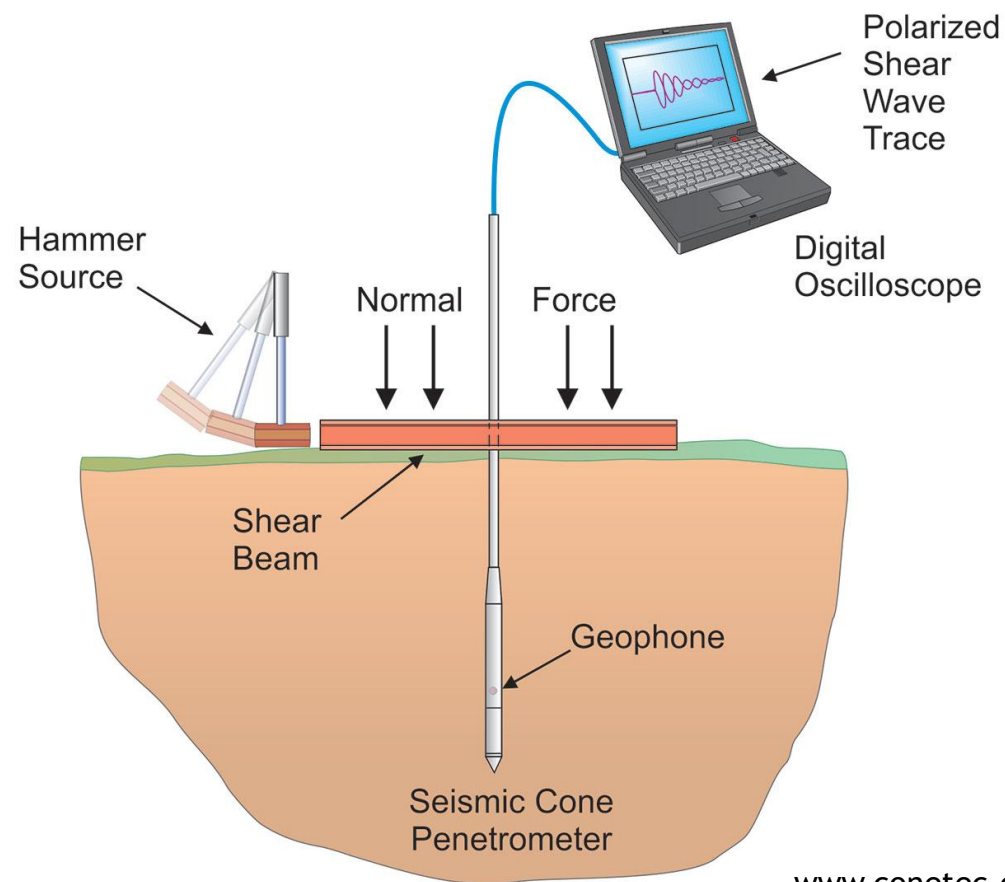


www.marchetti-dmt.it

Zastosowane metody badawcze

► SCPTU

- Pomiar sejsmiczny w trakcie standardowego badania CPTU.
- Testy w systemie odcinkowym, w odstępach ok. $0,5 \div 1,0$ m.
- Pomiar dokonywany na odcinku pomiędzy poszczególnymi głębokościami odpowiadającymi kolejnym cyklom pomiarowym.
- Prędkość propagacji fali obliczana na podstawie różnic czasowych w rejestracji fali.
- W dalszych transformacjach wyznaczany jest moduł ścinania G_0 .



www.conetec.com

Lokalizacja i opis węzłów badawczych

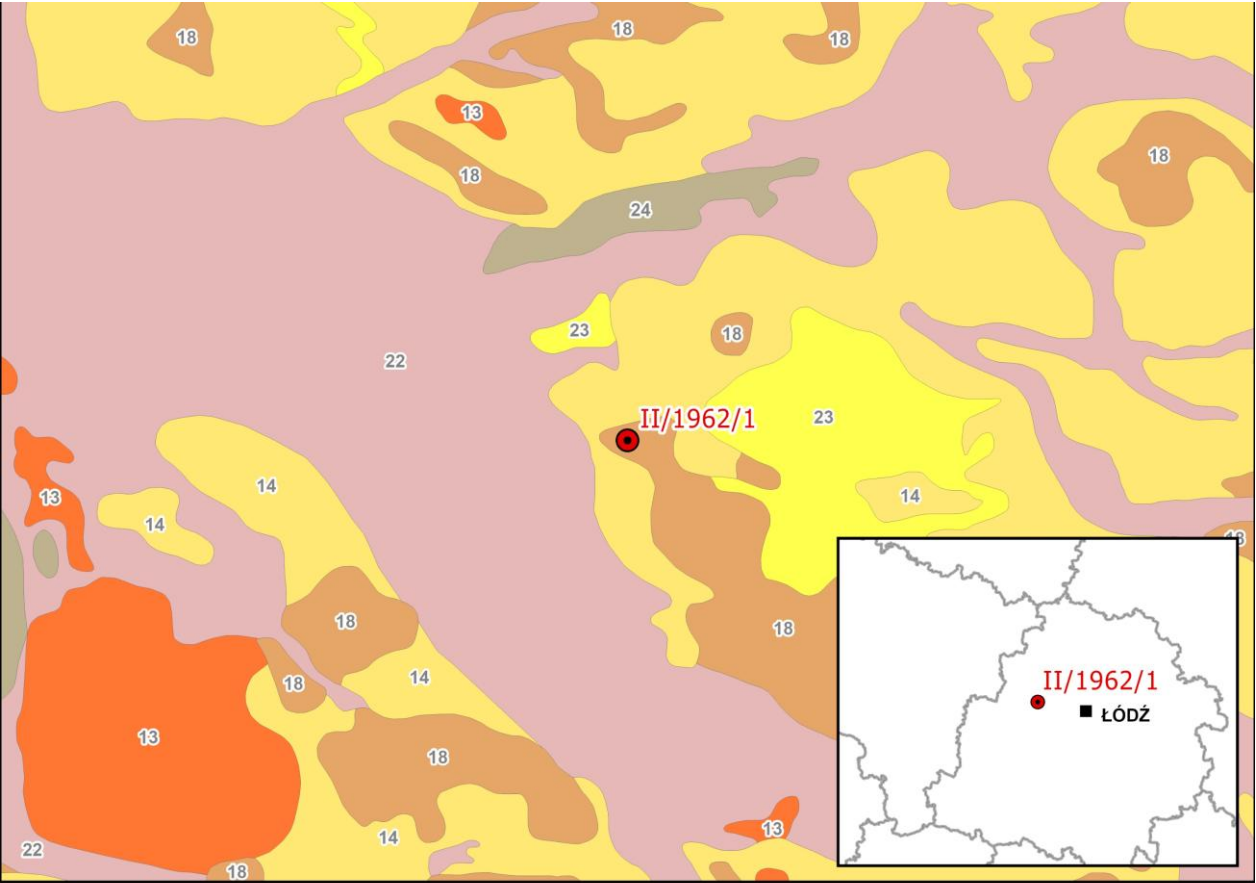


Sfinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ



Mianów - otwór II/1962/1

Węzeł badawczy na tle Przeglądowej mapy geologiczno-inżynierskiej w skali 1:300 000

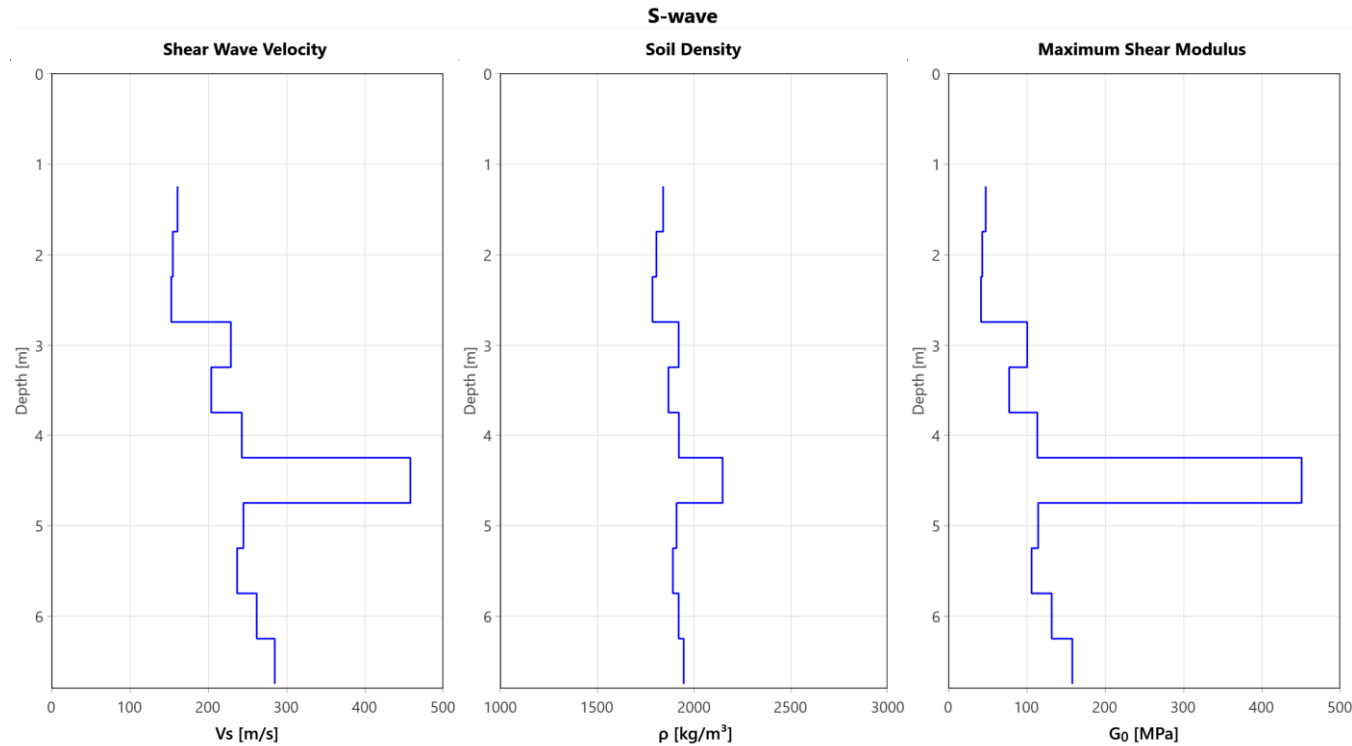


18 Obszar glin zwałowych o nachyleniu zboczy 0-3%, Warunki budowlane dobre; pogarszają się w miarę wzrostu zawodnienia

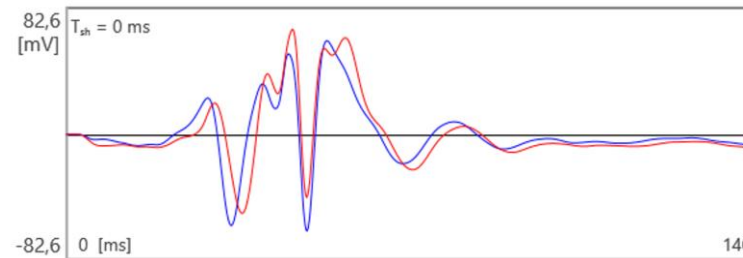
Wiercenie	Głębokość zwierciadła wody [m p.p.t.]	Stratigrafia	Skala [m]	Profil	Przebieg [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu
1	2	3	4	5	6	7	8
	6.2	Kred Czwartorzęd	-2.0		0.80	piasek średnioziarnisty	Ps
	9.6	Kred Czwartorzęd	-4.0		3.40	głina piaszczysta	Gp
	12.8	Czwartorzęd	-6.0		6.20	głina	G
	16.0	Czwartorzęd	-8.0		7.80	piasek gruboziarnisty ze żwirami	Pr+Ż
	22.8	Czwartorzęd	-10.0			głina	G
	34.0	Neogen	-12.0				
		Neogen	-14.0				
		Kred górn.	-16.0				
		Kred górn.	-18.0				
		Kred górn.	-20.0				
		Kred górn.	-22.0				
		Kred górn.	-24.0				
		Kred górn.	-26.0				
		Kred górn.	-28.0				
		Kred górn.	-30.0				
		Kred górn.	-32.0				
		Kred górn.	-34.0				
		Kred górn.	-36.0				
		Kred górn.	-38.0				
		Kred górn.	-40.0				
		Kred górn.	-42.0				
		Kred górn.	-44.0				
		Kred górn.	-46.0				
		Kred górn.	-48.0				
		Kred górn.	-50.0				
		Kred górn.	-52.0				
		Kred górn.	-54.0				
		Kred górn.	-56.0				
		Kred górn.	-58.0				
		Kred górn.	-60.0				
					61.40		

Mianów - otwór II/1962/1

SDMT



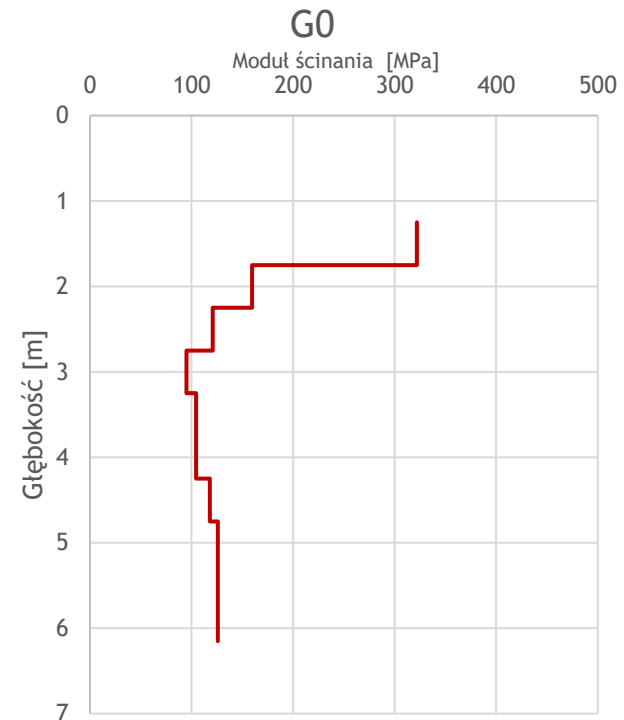
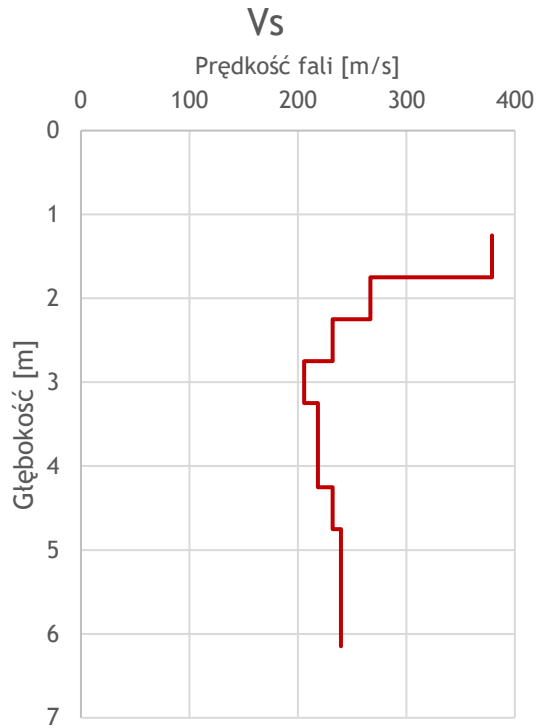
Przykładowy przebieg fali S



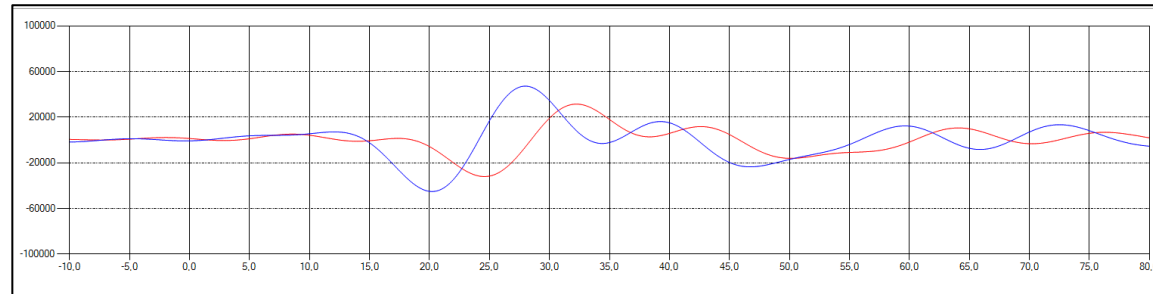
$Z = 4,5$ m
 $D_s = 0,49$ m
 $D_t = 0,58$ ms
 $V_s = 835$ m/s
24.08.2026
10:27:50

Mianów - otwór II/1962/1

SCPTU

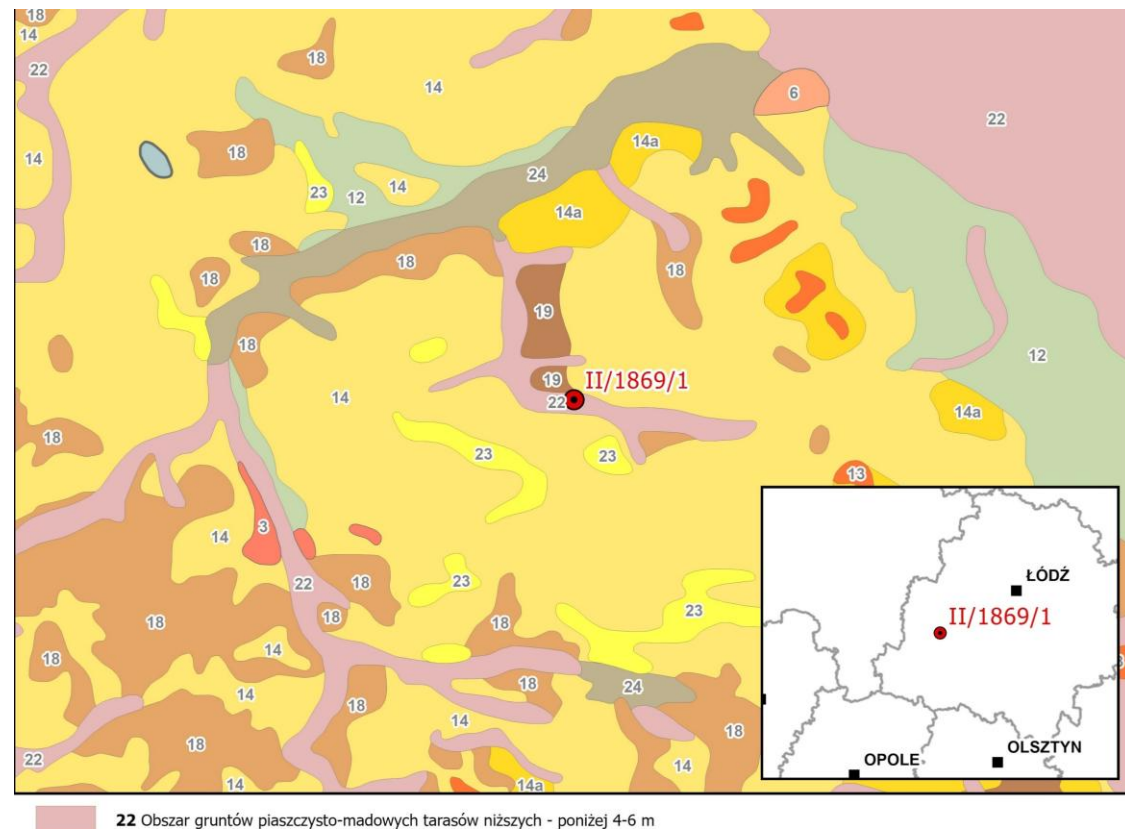


Przykładowy przebieg fali S,
głębokość 5,0 m



Dąbrowa Wielka - otwór II/1869/1

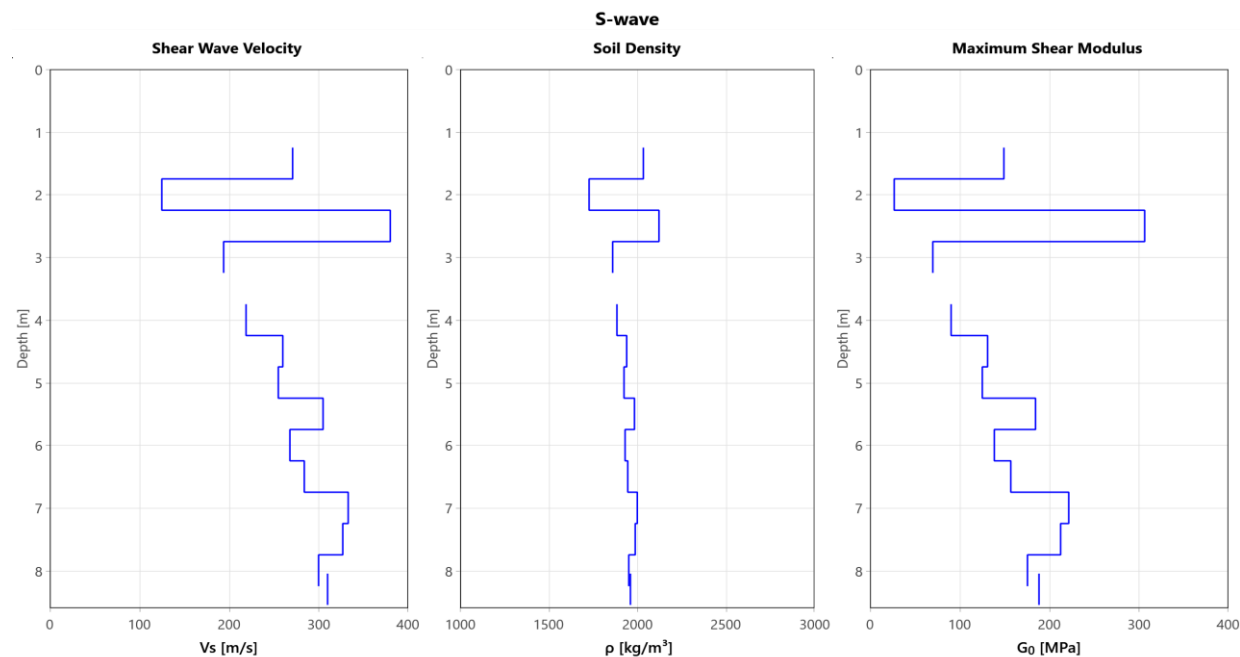
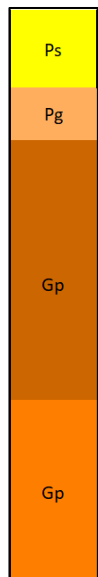
Węzeł badawczy na tle Przeglądowej mapy geologiczno-inżynierskiej w skali 1:300 000



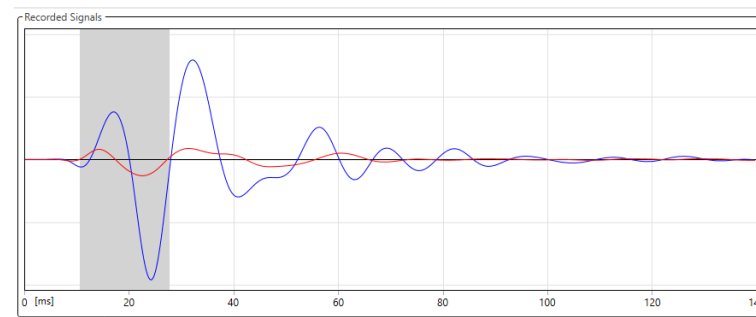
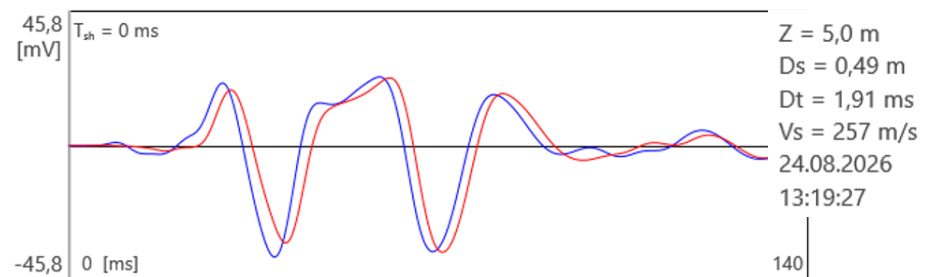
Głębokość zwierciadła wody [m p.p.t.]	Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przelot [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu
2	3	4	5	6	7	8
	Czwartorzęd					
	Holocen	2.0		0.40	gleba	Ps
		4.0		1.40	piasek średnioziarnisty	Pg
		6.0		2.30	piasek gliniasty	Gp
		8.0			głina piaszczysta	
		10.0		6.20	głina	G
		12.0		10.90	rumosz (marglisty)	KR(m)
		14.0		12.00	margle ilaste	
		16.0		16.00	margle	S(m)
		18.0				
		20.0				
		22.0				
		24.0				
		26.0				
		28.0				
		30.0		30.00	wapień marglisty	S(w)
		32.0				
		34.0				
		36.0				
		38.0				
				39.50		
	Kreda					
	Kreda górna					

Dąbrowa Wielka - otwór II/1869/1

SDMT

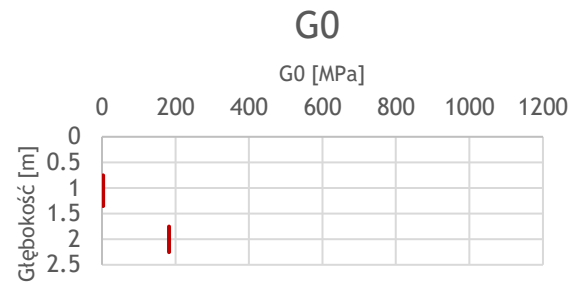
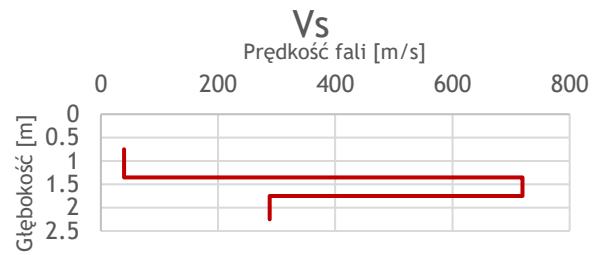
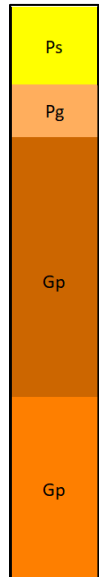


Przykładowe przebiegi fali S

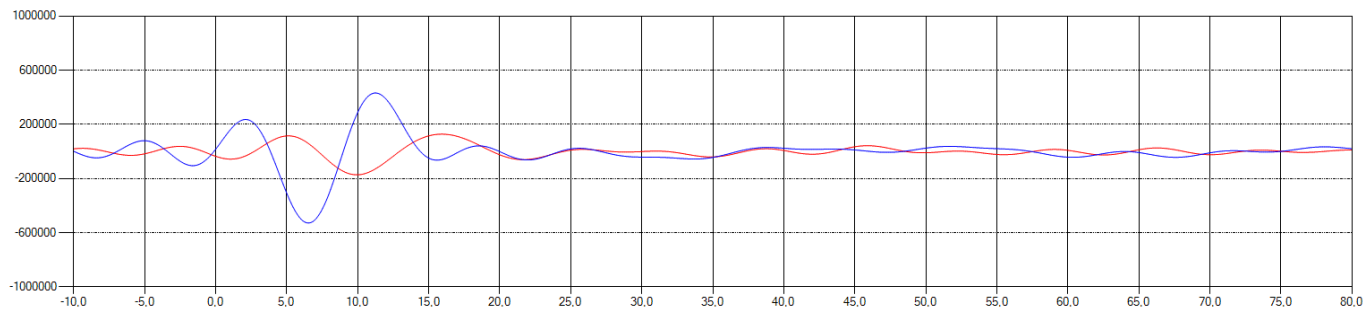


Dąbrowa Wielka - otwór II/1869/1

SCPTU

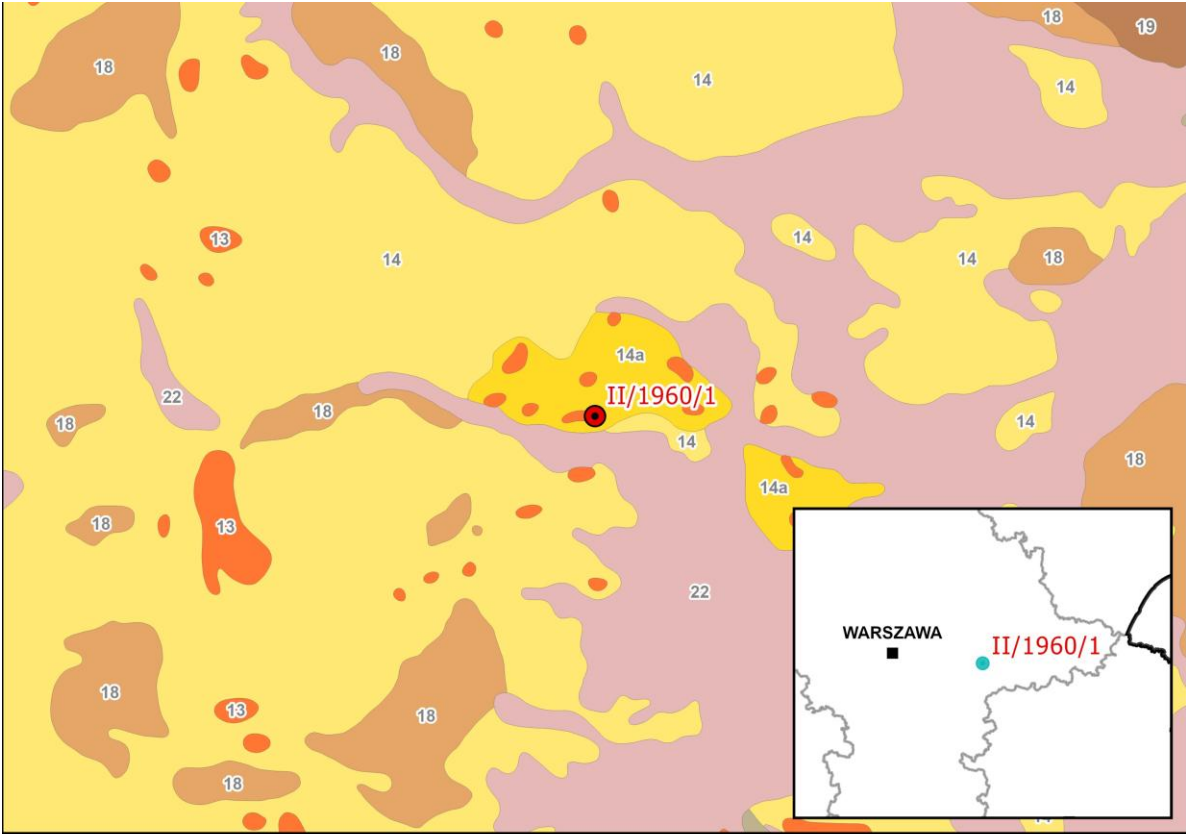


Przykładowy przebieg fali S, głębokość 2,0 m



Grodzisk - otwór II/1960/1

Węzeł badawczy na tle Przeglądowej mapy geologiczno-inżynierskiej w skali 1:300 000

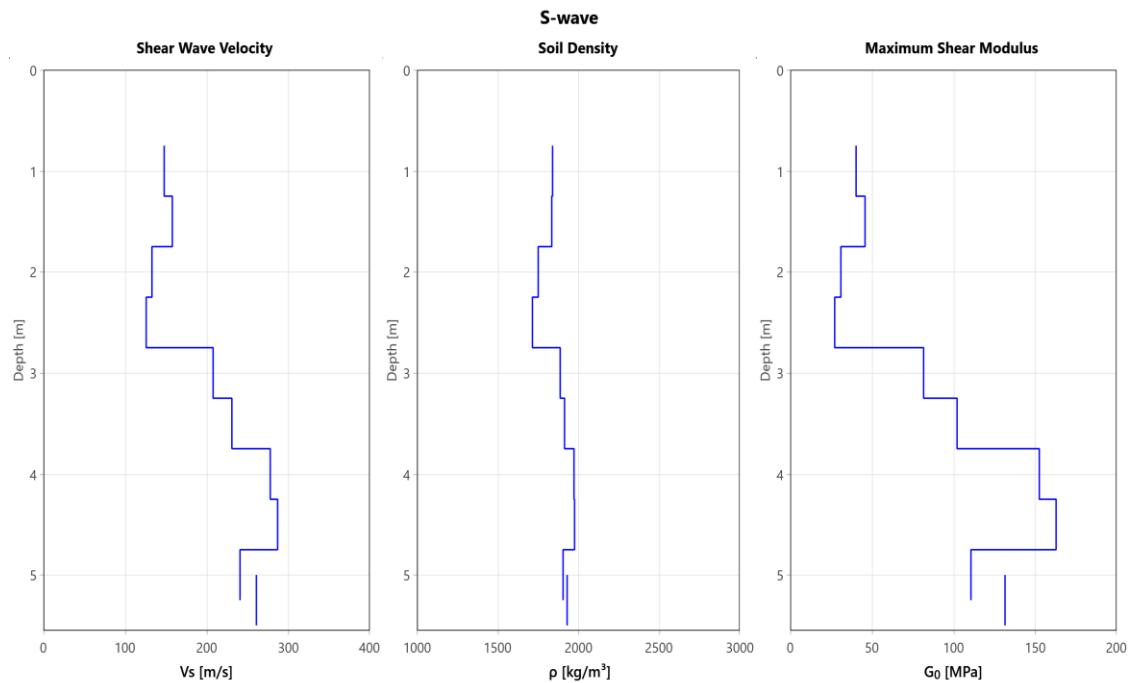
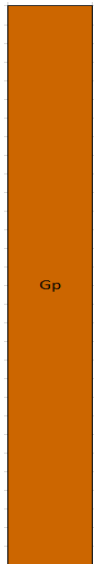


14a Obszar gruntów piaszczysto-żwirowych akumulacji wodnolodowcowej i lodowcowej o nachyleniu zboczy powyżej 3%

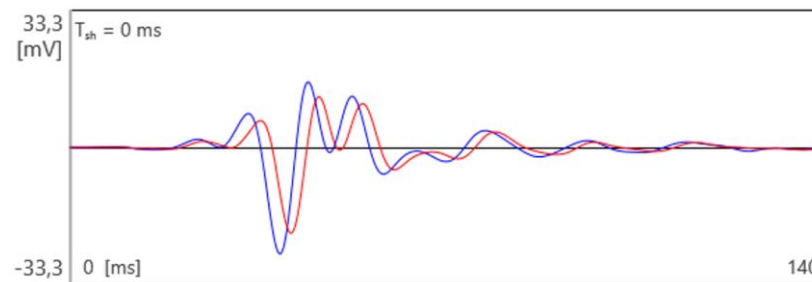
Głębokość zwiędziadła wody [m p.p.t.]	Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przełot [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu
2	3	4	5	6	7	8
	Holocen			0.30	gleba głina piaszczysta	Gp
	Czwartorzęd			38.00	pył piaszczysty	IIp
				43.00	piasek pylasty	Pπ
				47.00	piasek drobnoziarnisty	Pd
				51.50	głina	G
				53.50		

Grodzisk - otwór II/1960/1

SDMT



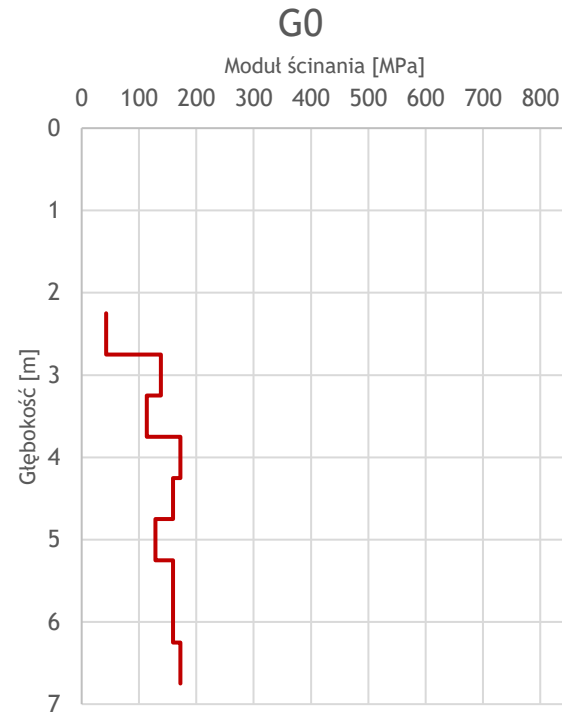
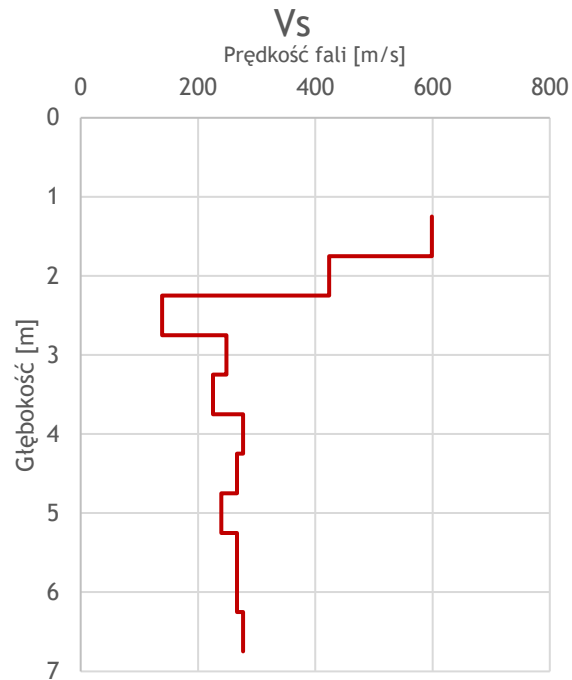
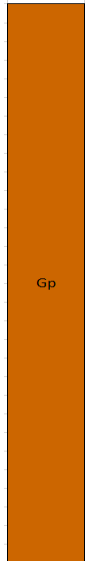
Przykładowy przebieg fali S



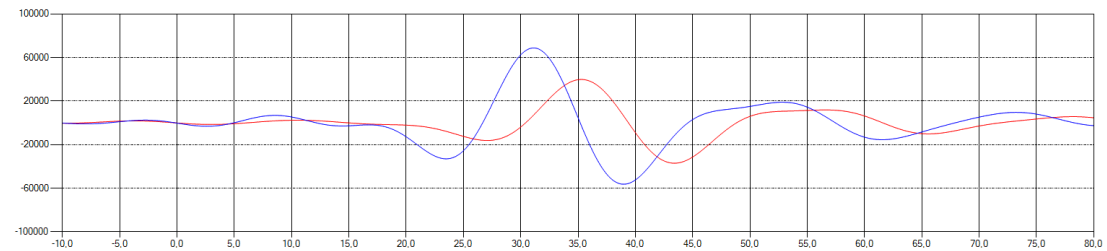
Z = 5,0 m
Ds = 0,49 m
Dt = 2,03 ms
Vs = 241 m/s
25.08.2026
17:19:55

Grodzisk - otwór II/1960/1

SCPTU

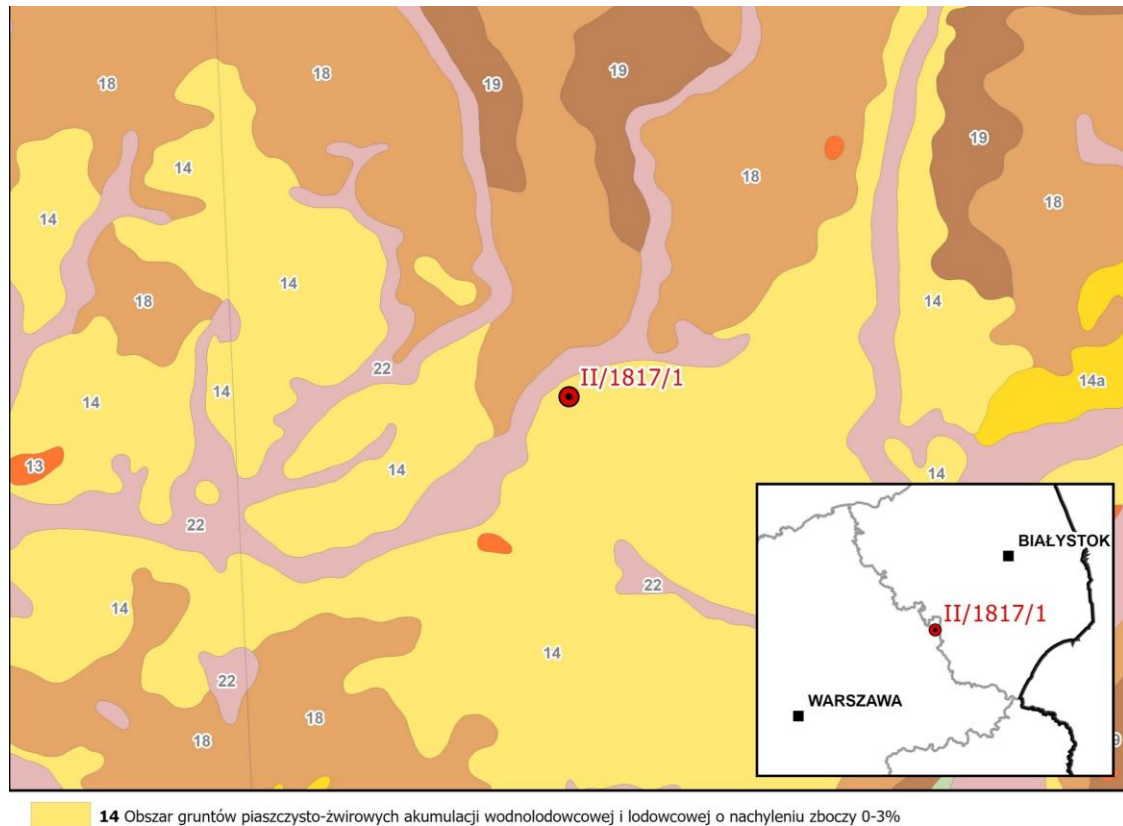


Przykładowy przebieg fali S,
głębokość 5,0 m



Boguty-Pianki - otwór II/1817/1

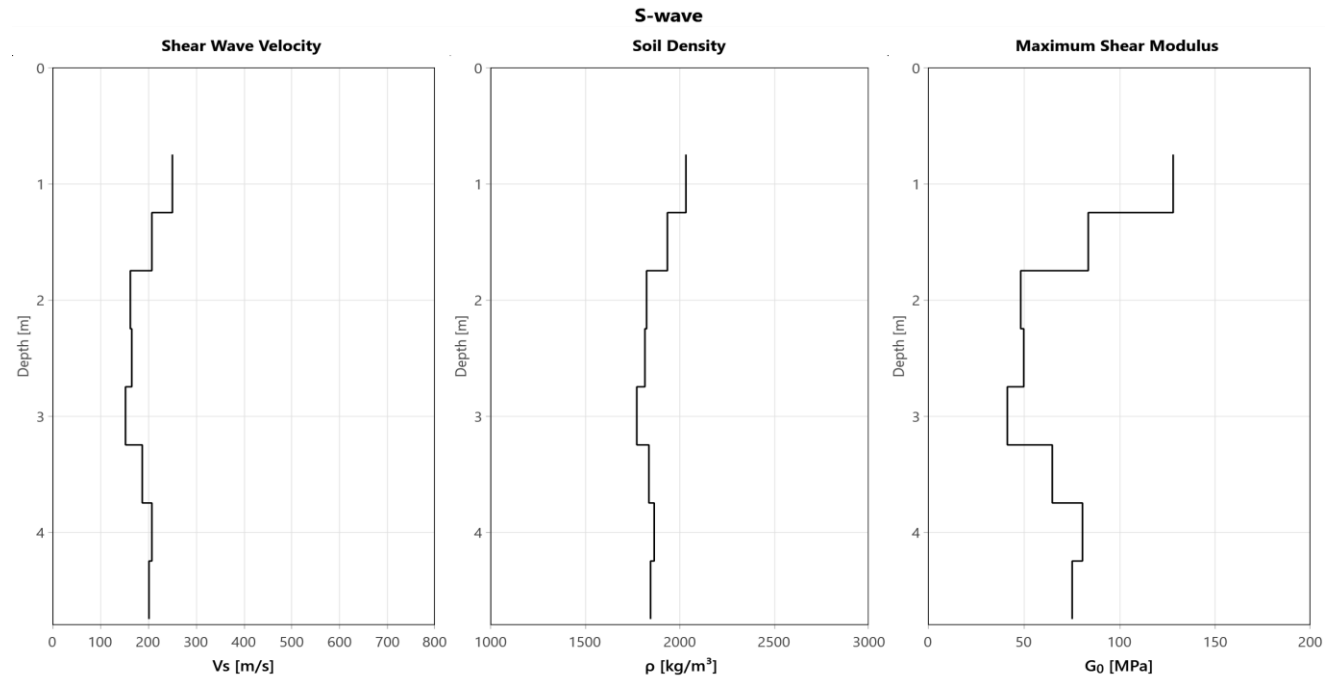
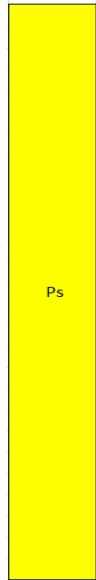
Węzeł badawczy na tle Przeglądowej mapy geologiczno-inżynierskiej w skali 1:300 000



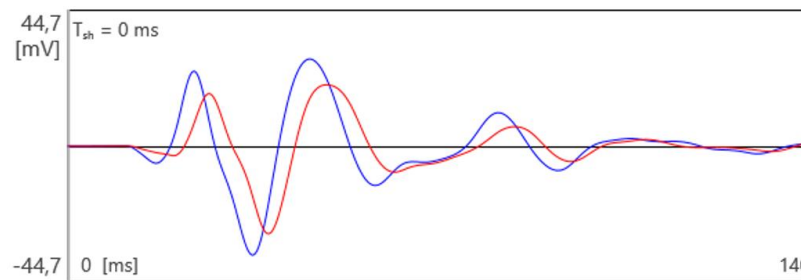
Głębokość z wierciadła wody [m p.p.t.]	Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przelot [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	Warstwa geotechniczna	Wilgotność
2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.8	1.80	2.0		0.20	gleba piasek średni	Ps	nw	
		8.0		8.00	piasek gruby	Pr		
		9.0		9.00	piasek średni na pograniczu piasku gliniastego	Ps/Pg		
		10.0		10.00	piasek drobny na pograniczu piasku gliniastego	Pd/Pg		
		17.5		17.50	piasek drobny	Pd	nw	
		20.0		20.00	piasek średni	Ps		
		28.5		28.50	gлина piaszczysta	Gp		
		35.0		35.00	piasek drobny	Pd		
		54.0		54.00				

Boguty-Pianki - otwór II/1817/1

SDMT

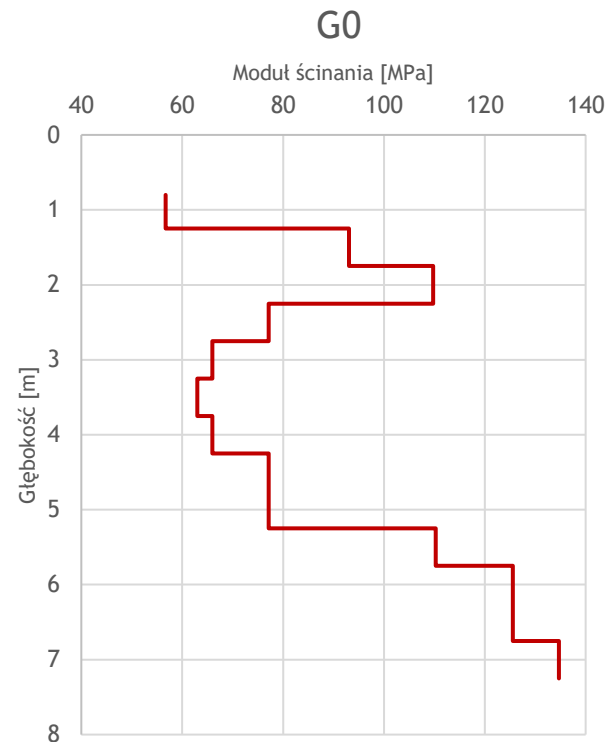
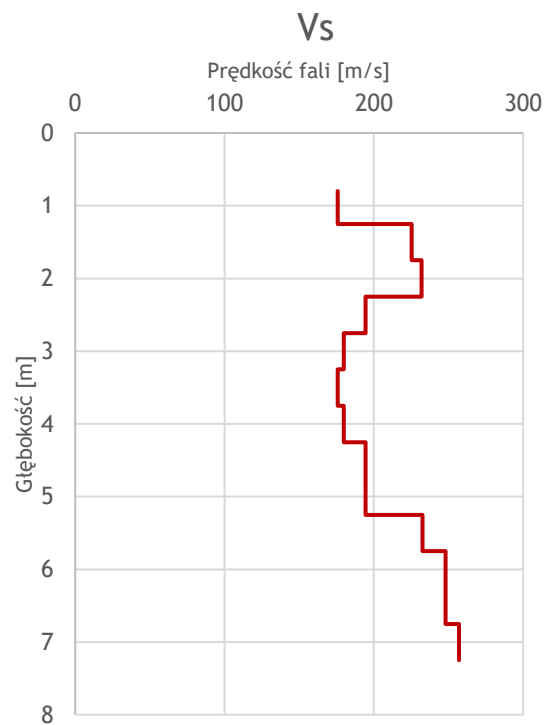
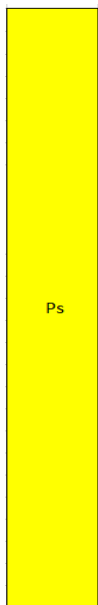


Przebieg fali S

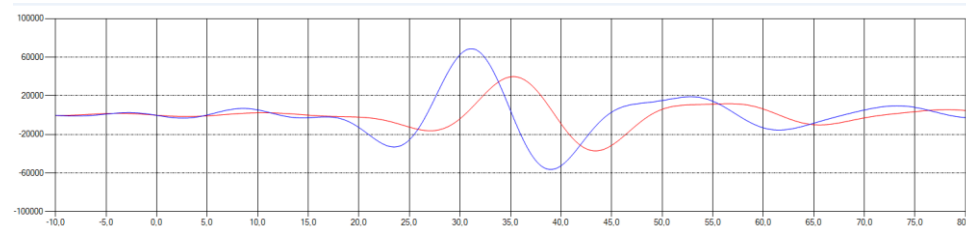


Z = 3,0 m
Ds = 0,47 m
Dt = 3,05 ms
Vs = 155 m/s
26.08.2026
11:55:45

Boguty-Pianki - otwór II/1817/1 SCPTU

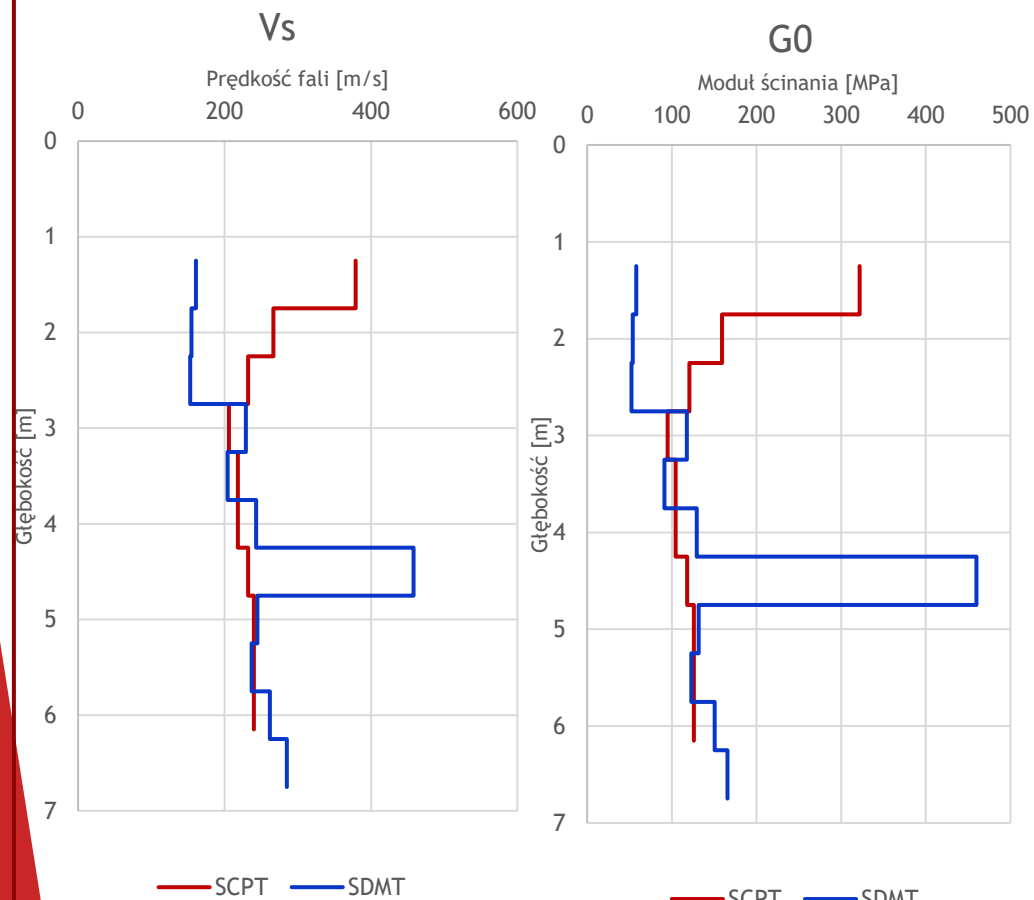


Przykładowy przebieg fali S,
głębokość 5,0 m

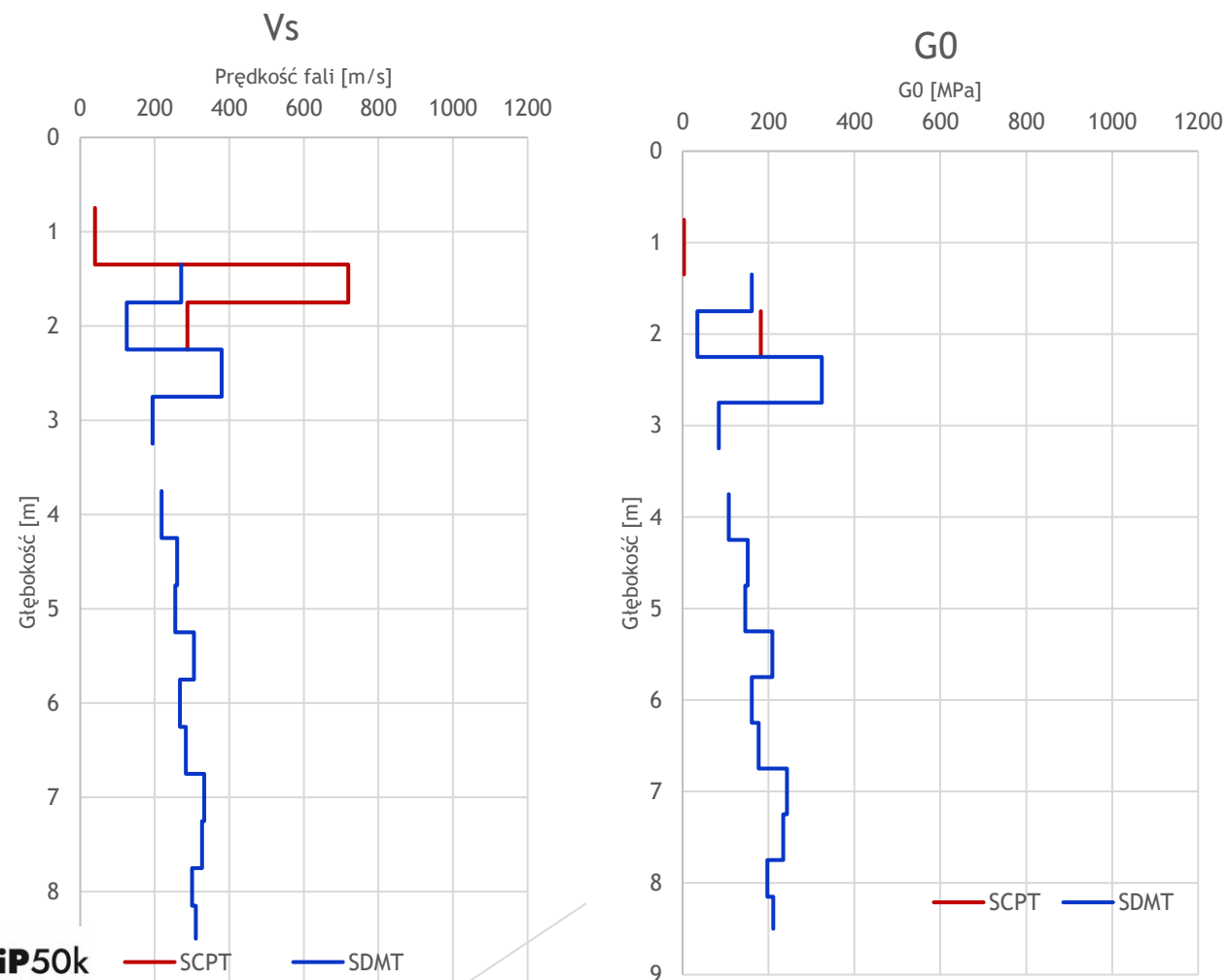


Porównanie metod badawczych

Mianów

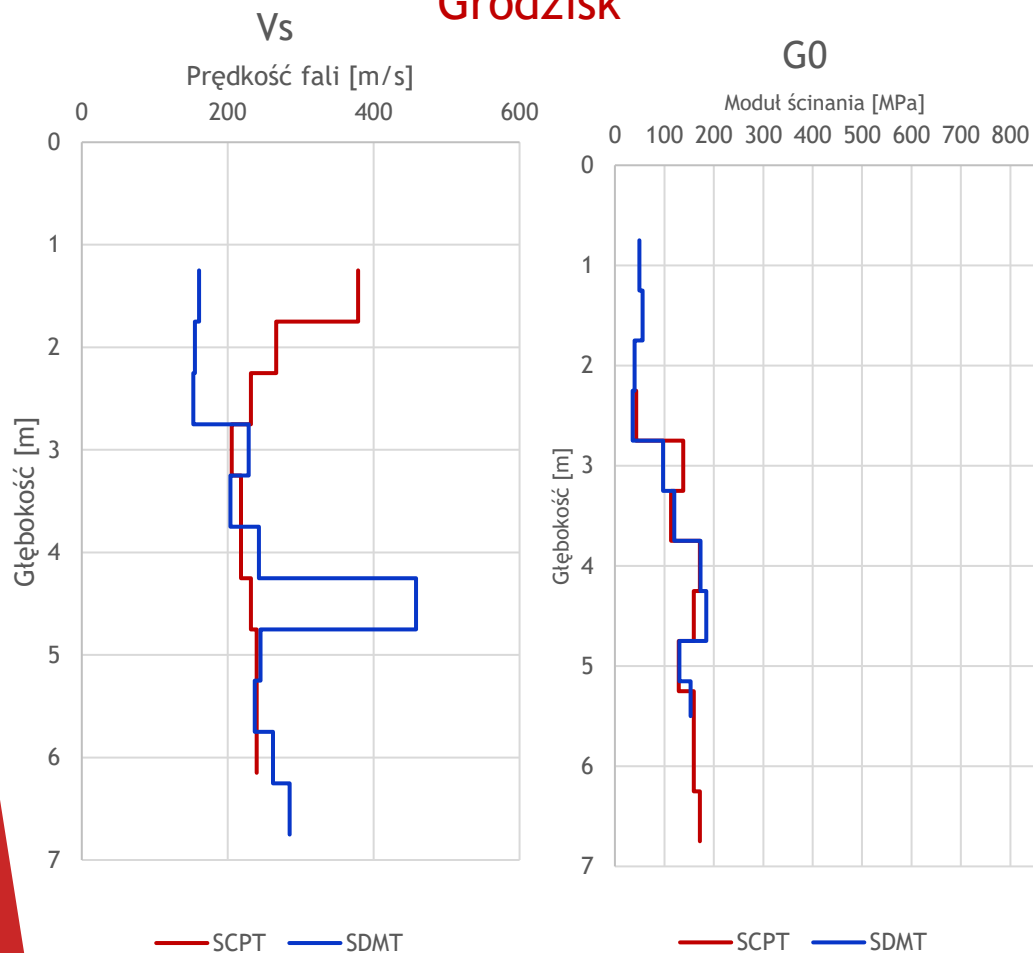


Dąbrowa Wielka

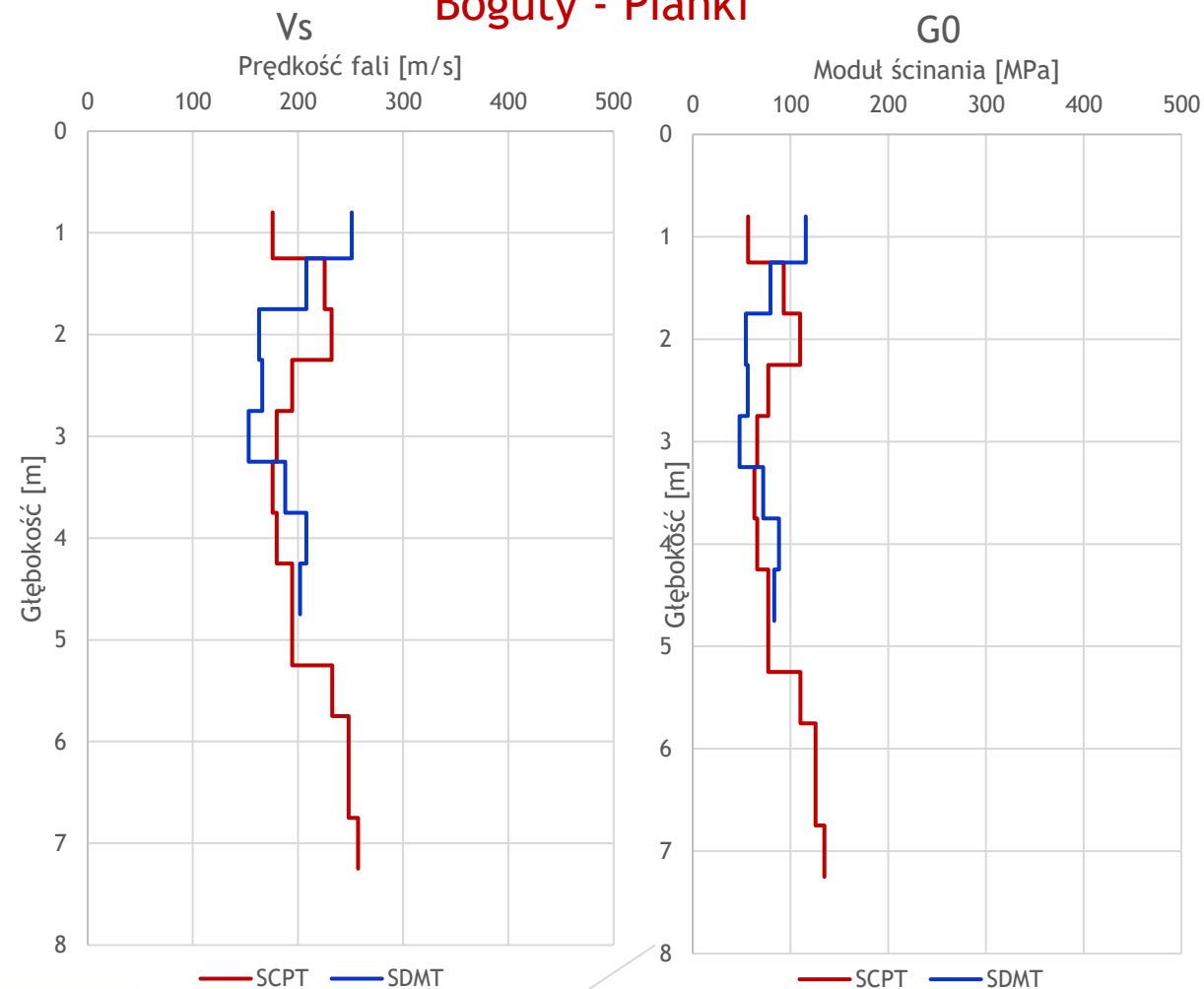


Porównanie metod badawczych

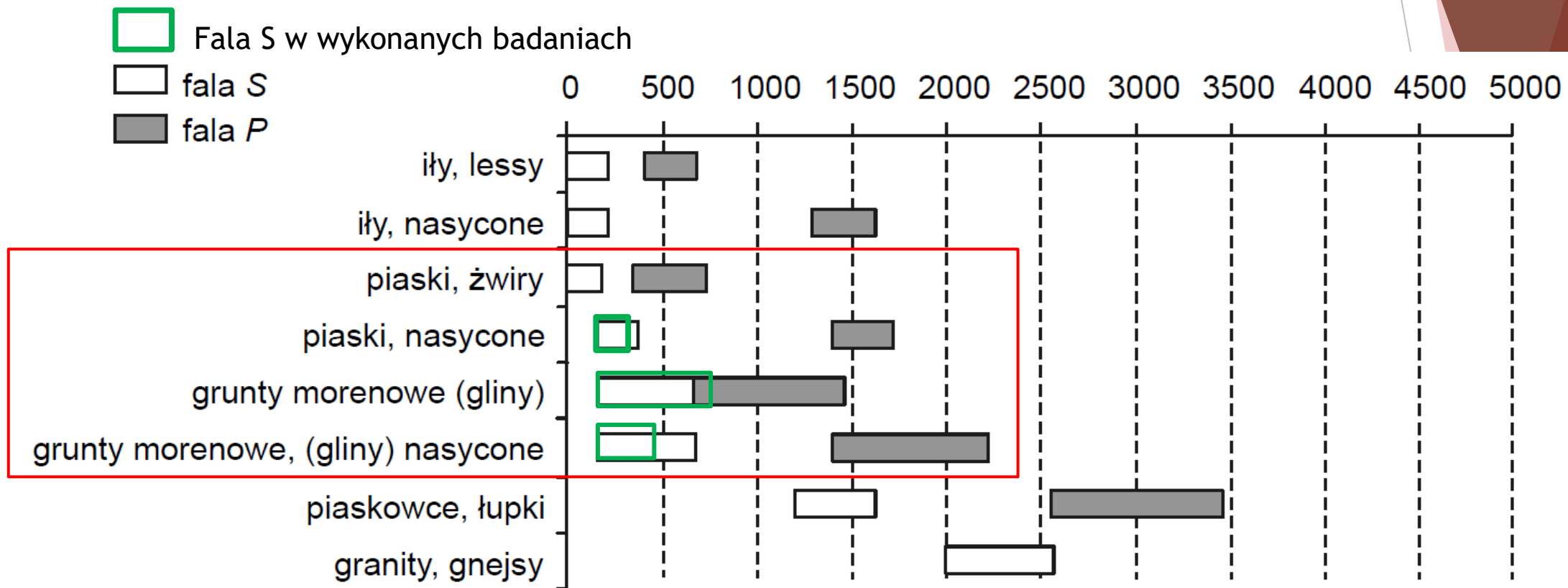
Grodzisk



Boguty - Pianki

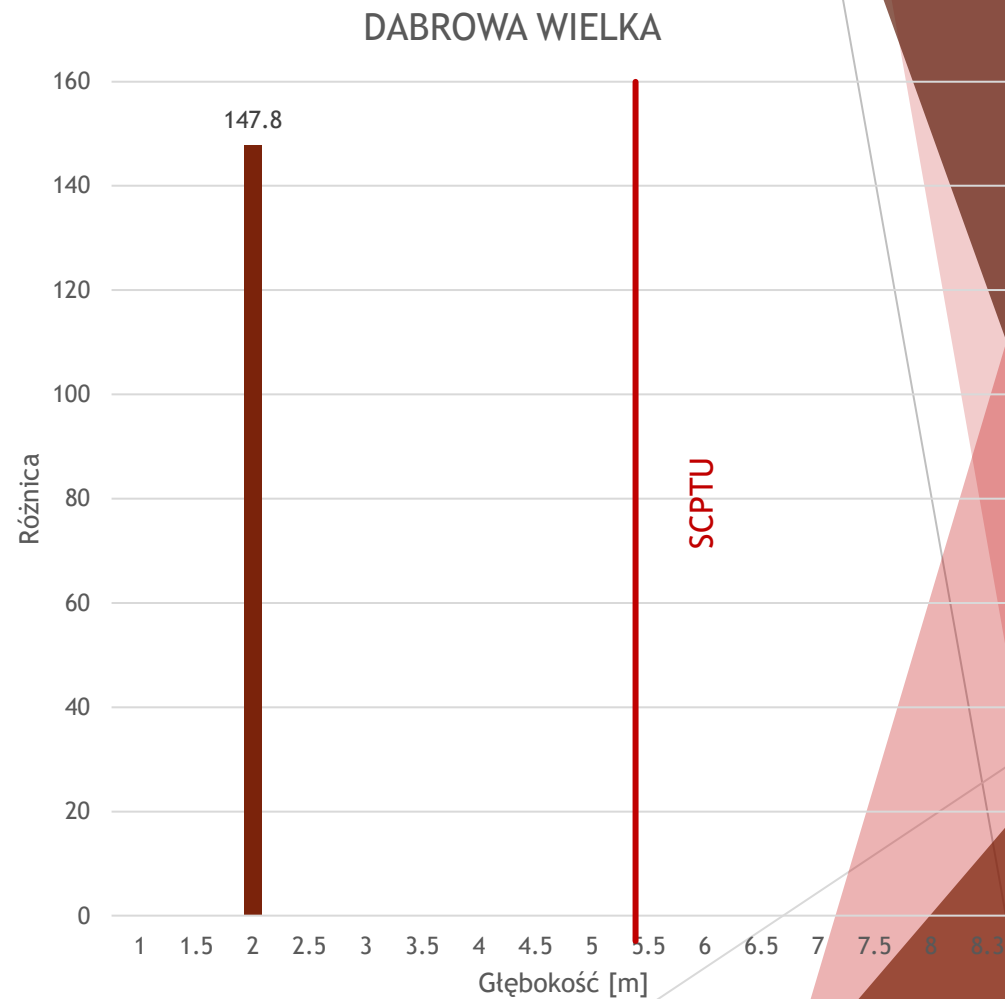
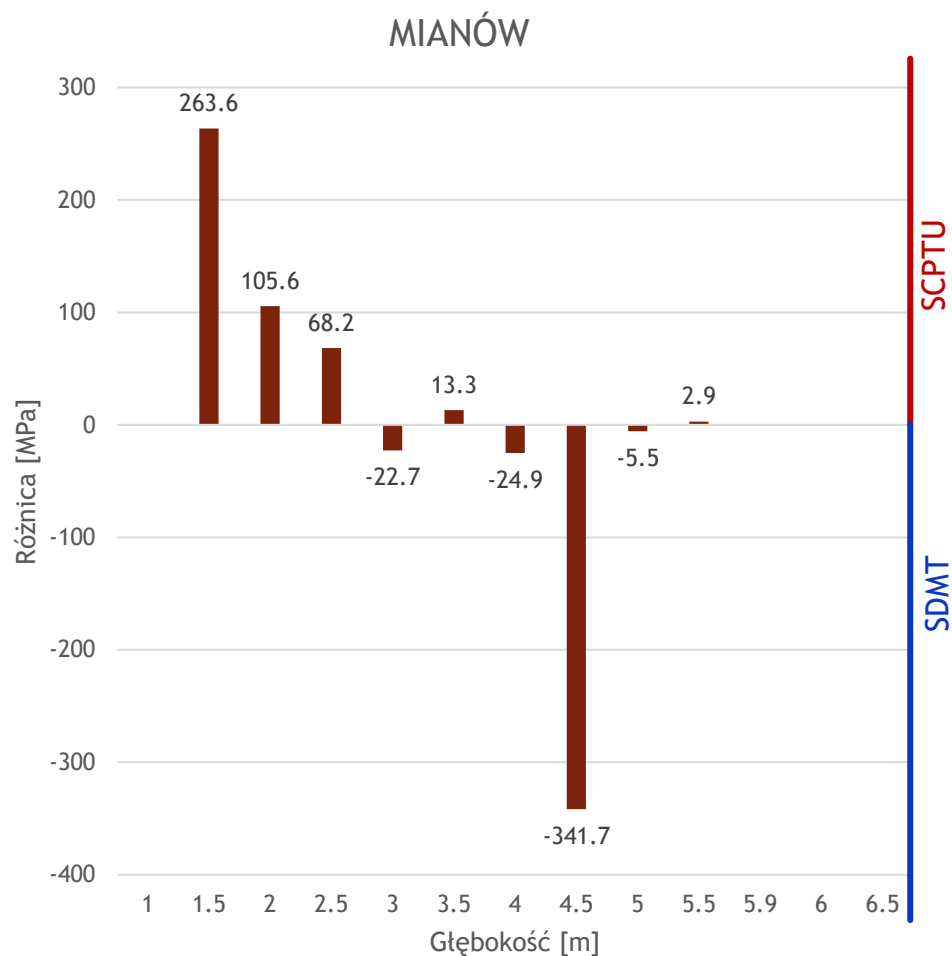


Porównanie metod badawczych - dane literaturowe

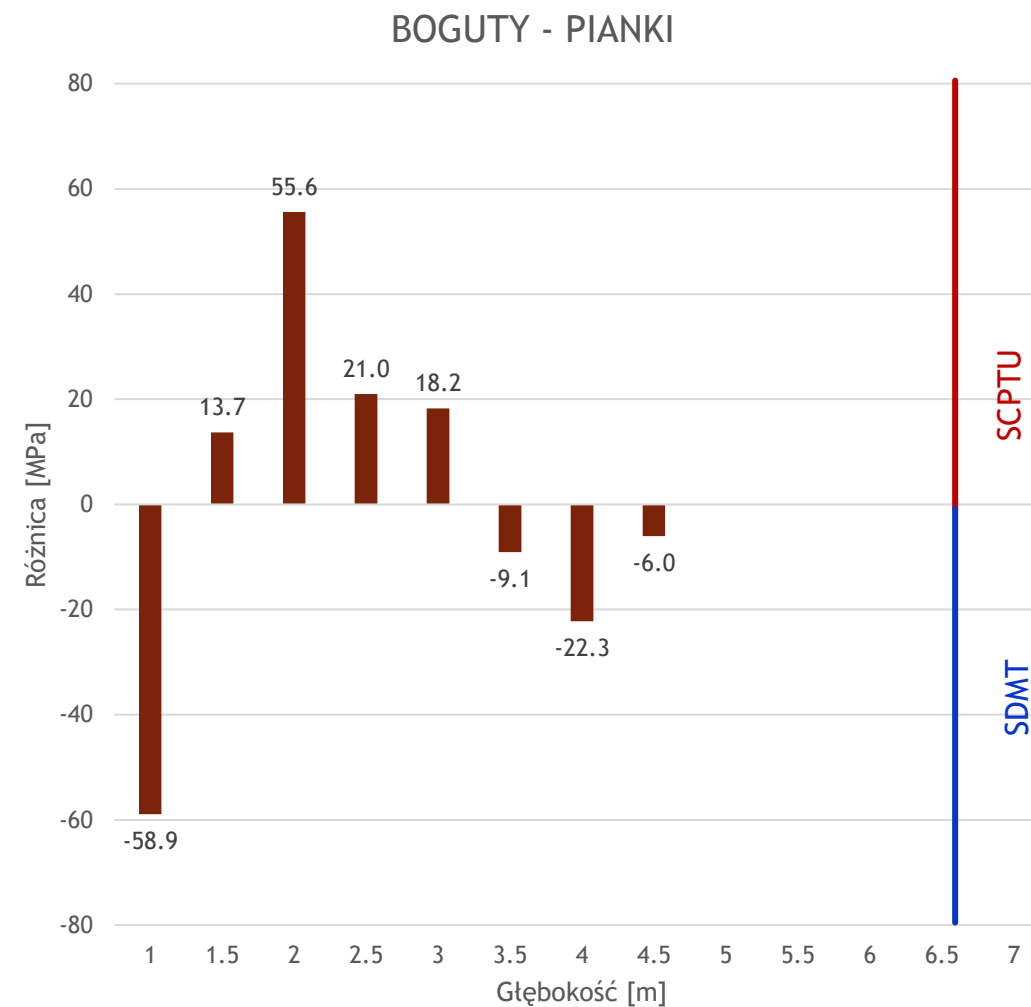
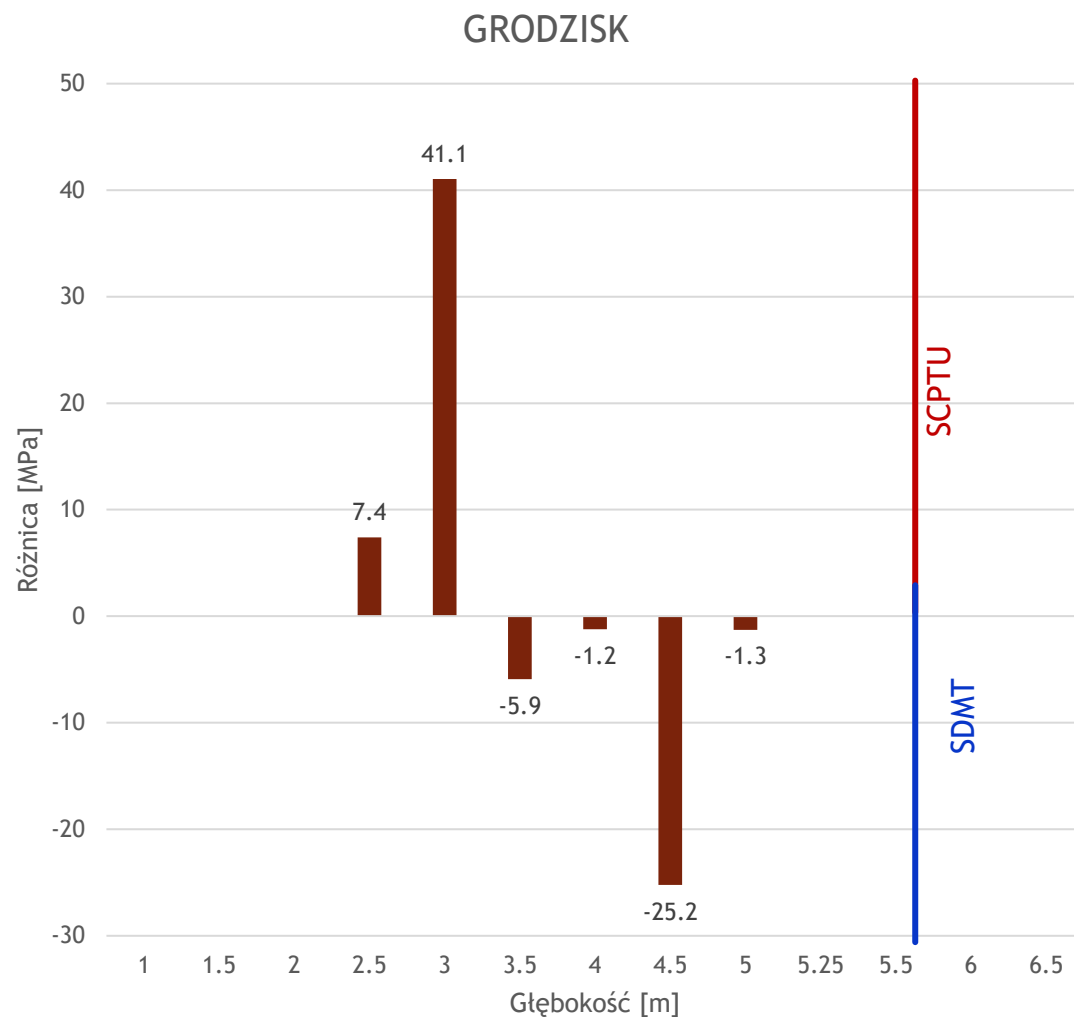


Godlewski, Szczepański, 2015

Porównanie metod badawczych - Różnica G0 pomiędzy metodami SCPT-SDMT



Porównanie metod badawczych - Różnica G0 pomiędzy metodami SCPT-SDMT



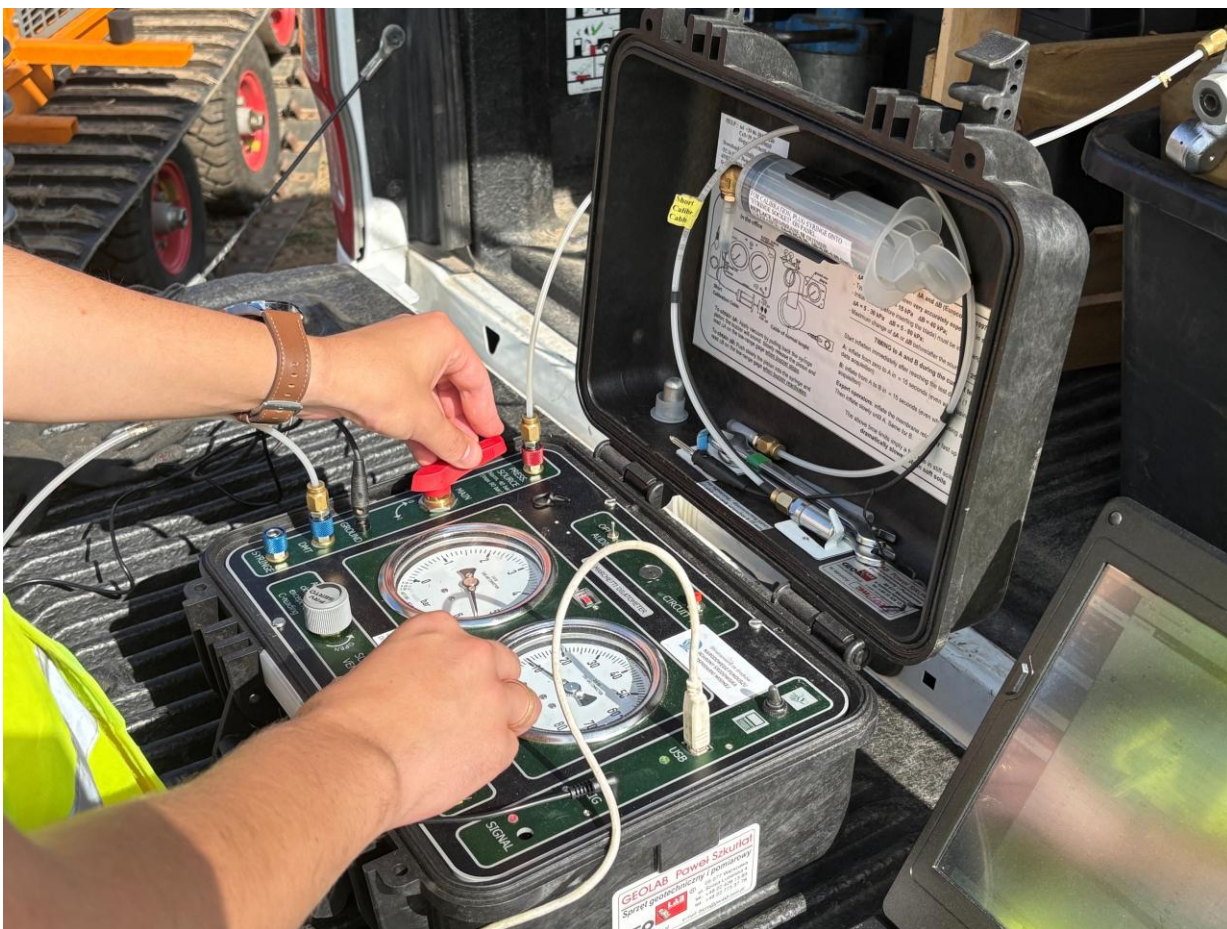
WNIOSKI

- ▶ Na jakość pomiarów sejsmicznych wpływa ustawienie i sprzężenie źródła sejsmicznego z podłożem. Szczególne znaczenie ma stabilne zabezpieczenie kowadła oraz zachowanie powtarzalnych warunków generowania impulsu, ponieważ niewłaściwe sprzężenie może wpływać na amplitudę i kształt rejestrowanego sygnału, a tym samym na identyfikację czasu przyścia fali.
- ▶ Podczas ręcznej generacji fali powstały sygnał może mieć różną charakterystykę częstotliwościową oraz różną długość. Przy analizie zarejestrowanego sygnału i wyznaczaniu czasu dojścia pojawiają się efekty rozmycia sygnału, co z kolei generuje niepewność (błąd) wyznaczenia momentu dotarcia fali i błąd określenia prędkości.
- ▶ Zaobserwowano zmianę relacji między wynikami SDMT i SCPTU. W przypadku strefy powierzchniowej V_s uzyskane za pomocą SCPTU były większe, natomiast poniżej około 3 m nieznacznie większe wartości uzyskano z SDMT. Obserwowane różnice mogą być związane z zakłóceniami występującymi w płytkich partiach badania.
- ▶ Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku modułu początkowego ścinania G_0 . Różnice te wynikają przede wszystkim z różnic w wyznaczonych prędkościach fali poprzecznej V_s , które są potęgowane w obliczeniach G_0 ze względu na zależność $G_0 = \rho V_s^2$.
- ▶ Przy obliczeniach modułu ścinania przy bardzo małych odkształceniach należy zwrócić szczególną uwagę na wiarygodne określenie gęstości gruntu, aby uzyskać jak najbardziej rzetelne wyniki modułu ścinania.
- ▶ Zastosowanie SCPTU i SDMT jako metod penetracyjnych umożliwia wykonanie badań sejsmicznych bez konieczności wykonywania otworu wiertniczego, co może ograniczyć czas i koszt rozpoznania. Jednocześnie metody te są zależne od możliwości penetracji podłoża.
- ▶ W gruntach o dużej wytrzymałości, zawierających żwiry czy głazy ograniczeniem zastosowania metod SCPTU i SDMT może być brak możliwości osiągnięcia zakładanej głębokości sondowania, a w konsekwencji brak pomiarów dla głębszych partii podłoża.
- ▶ Uzyskane wyniki można interpretować semi-automatycznie. Należy pamiętać aby interpretację automatyczną weryfikować!

Co dalej?

- ▶ Analiza fal podłużnych - w toku
- ▶ Dalsze porównywanie metod badawczych
- ▶ Dodanie do analizy porównawczej danych z PS-logging
- ▶ Porównanie pozyskanych danych z analizą MASW





**Dziękuję za uwagę
i zapraszam do
stoiska PIG-PIB!**