

# 8.WPGI 2024

Analiza porównawcza wyników badań metodą powierzchniowej sejsmiki inżynierskiej z sejsmiczną tomografią międzyotworową

**RADOSŁAW MIESZKOWSKI (WG UW)**

**RAFAŁ KUSZYK (HGS Sp z o. o.)**

**MAREK BARAŃSKI (HGS Sp z o. o.)**

**SEBASTIAN KOWALCZYK (WG UW)**

**TOMASZ GODLEWSKI (ITB)**

**STANISŁAW MIESZKOWSKI (RMTERRA sp z o.o.)**



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# CEL

PRÓBA PORÓWNANIA WYNIKÓW BADAŃ ( $V_p$ ,  $V_s \rightarrow E, G, \nu$ ) uzyskanych z pomiarów metodami sejsmiki powierzchniowej

**SRT-P, SRT-S, MASW**

z wynikami **SBT**

w dowiązaniu do danych geologicznych.

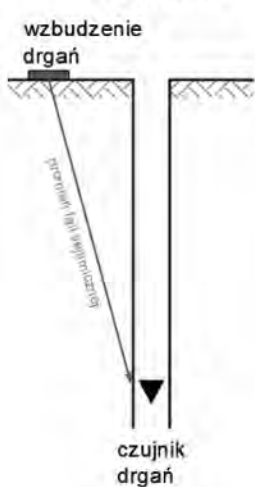


# LITERATURA

- **Becht, A., Bürger, C., Kostic, B., Appel, E., Dietrich, P., 2007.** High-resolution aquifer characterization using seismic cross-hole tomography: An evaluation experiment in a gravel delta, *Journal of Hydrology*, **336**: 171-185.
- **Brown, L.T., 1998.** Comparison of Vs profiles from SASW and borehole measurements at strong motion sites in southern California: M.Sc. Eng. Thesis, University of Texas at Austin
- **Butchibabu, B., Sandeep, N., Sivaram, Y.V., Jha, P.C., Khan, P.K., 2017.** Bridge pier foundation evaluation using cross-hole seismic tomographic imaging, *Journal of Applied Geophysics*, **144**: 104-114.
- **Peng, D., Cheng, F., Liu, J., Zong, Y., Yu, M., Hu, G., Xiong, X., 2021.** Joint tomography of multi-cross-hole and borehole-to-surface seismic data for karst detection, *Journal of Applied Geophysics*, **184**: 104-252.
- **Fatkhan, Ryannugroho, R, Lawrens, F., Delliansyah, R., Prabowo, B.S., Rachmat Sule M., 2022.** Application of Cross-hole Seismic Tomography to Inferred Cavities Condition. The 4th Southeast Asian Conference on Geophysics (SEACG 2022), **1227** 012014.
- **Yannick Choy Hing Ng , William Danovan , and Taeseo Ku, 2019,** The potential of seismic cross-hole tomography for geotechnical site investigation, *E3S Web of Conferences* 92, 18006 (2019) IS-Glasgow 2019
- **Ivansson, S., 1986.** Seismic borehole tomography—Theory and computational methods. *Proceedings of the IEEE*, 74 (2): 328-338.
- **Kasina, Z., 1994.** Możliwości poprawy odwzorowań prędkościowych w tomografii sejsmicznej *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geosynoptyka i Geotermia*, 4–5: 100–118. (in Polish).



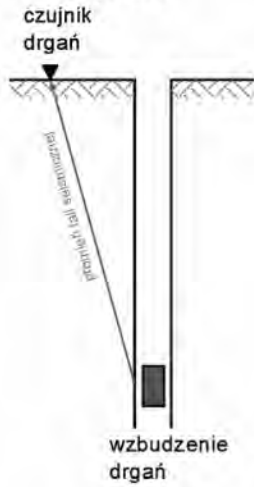
## Downhole



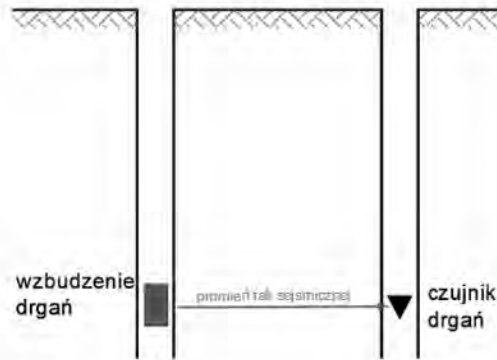
Designation: D 7400 – 08

### Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing

## Uphole



## Crosshole



Designation: D4428/D4428M – 07

### Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing

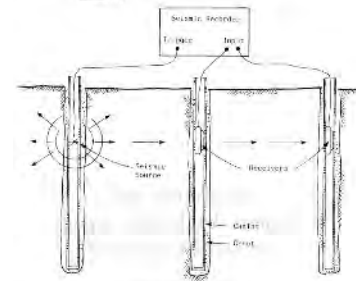
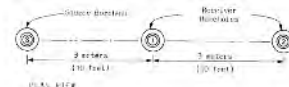
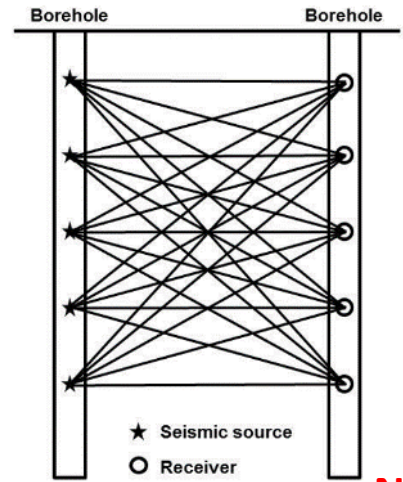


FIG. 3 Crosshole Seismic Test

## SBT



★ Seismic source  
○ Receiver

**Norma?**



|  |  |
|--|--|
| Maksymalna średnica wiercenia  | 175 mm (7 cali)  |
| Średnica wewnętrzna rur osłonowych   | od 50 do 100 mm (2 do 4 cali)  |
| Rodzaj rur osłonowych  | PVC, ABS lub aluminium, zamknięte u podstawy   |
| Rodzaj medium wypełniającego przestrzeń między gruntem a rurami osłonowymi | Zaprawa bentonitowo-cementowa o gęstości objętościowej zbliżonej do gęstości objętościowej otaczającego ośrodka, w celu ograniczenia strat energii przez ten falowod |

Wytczne rozpoznania i badań podłoża budowlanego dla inwestycji kolejowych dużych prędkości



# WYMAGANIA DOT POMIARÓW SBT – wytyczne CPK

Badania sejsmiczne w wariancie sejsmicznej tomografii międzyotworowej fali P i S (SBT-P, SBT-S), powinny być wykonywane na etapie **Projektu budowlanego** (PB) przy projektowaniu tuneli.

**Badania SBT należy zaprojektować pomiędzy otworami zlokalizowanymi po obu stronach planowanego tunelu** w strefach portali oraz w części środkowej, niezależnie od długości tunelu. W przypadku kiedy długość planowanego tunelu wynosi więcej niż 400 m, badania SBT należy zaprojektować w równomiernych odstępach, nie rzadziej niż co 200 m. **Badania techniką SBT muszą być zaprojektowane tak, żeby możliwe było wyznaczenie przestrzennego (dwuwymiarowego) pola wartości prędkości fal P i S, oraz wyliczenie parametrów sprężystych.** Głębokość otworów do badań SBT należy zaplanować tak aby sięgały one nie mniej niż 2 metry poniżej planowanej głębokości rozpoznania techniką SBT (tj. w przypadku rozpoznania do głębokości 30 m otwór powinien mieć głębokość 32 m). Przebieg profili i rozstaw geofonów należy dostosować do rozwiązań projektowych (przebiegu niwelety).

Tabela 27 Wymagania metodyczne dla badań geofizycznych na etapie PB

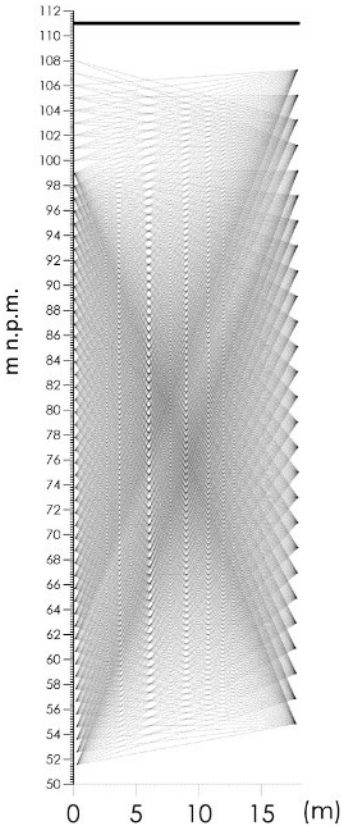
| Metoda   | SBT (SBT-P i SBT-S)   |
|--|---|
| krok pomiarowy (rozstaw, geofonów)                       | nie większy niż 1 m   |
| głębokość prospekcji dla obiektów inżynierskich          | nie mniej 30 m poniżej stropu planowanego tunelu  |
| tunele zlokalizowane w ciągu osi głównej drogi kolejowej | prześwietlenia w płaszczyznach pomiędzy otworami zlokalizowanymi po obu stronach planowanego tunelu w strefach portali oraz w części środkowej, niezależnie od długości tunelu<br>w przypadku kiedy długość planowanego tunelu wynosi więcej niż 400 m, badania SBT należy zaprojektować w równomiernych odstępach, nie rzadziej niż co 200 m |

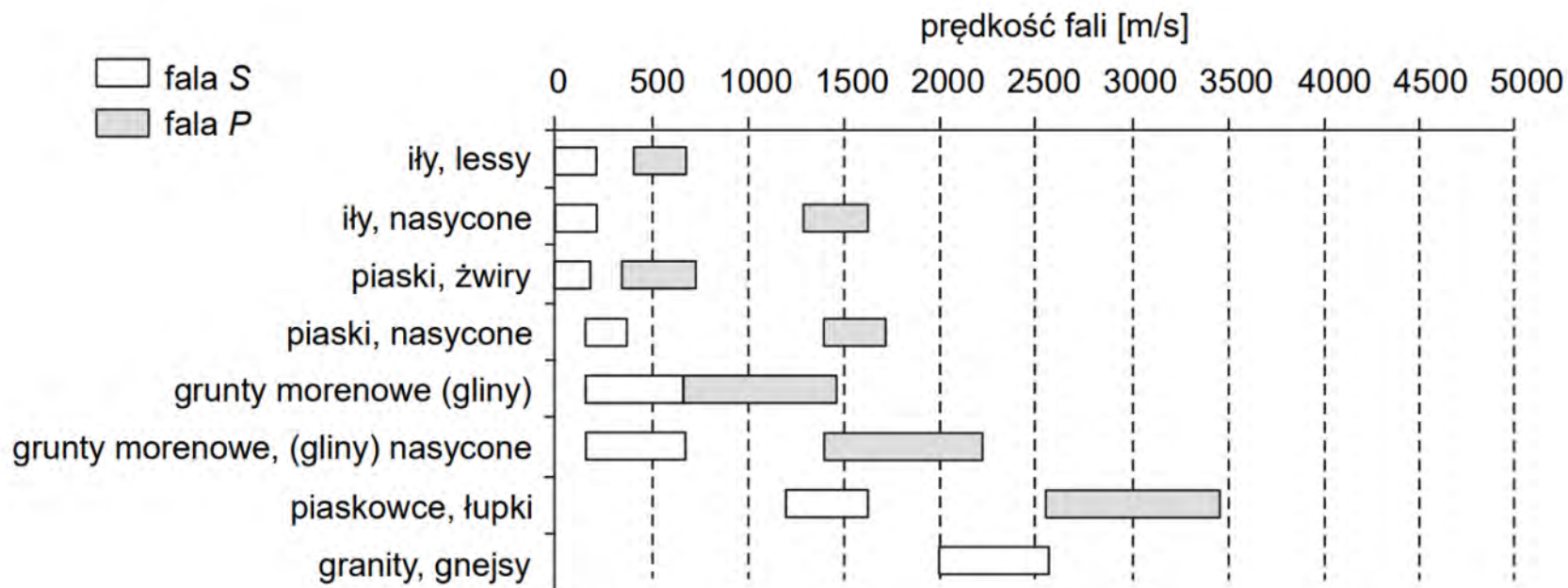


# Metoda SBT

Sejsmiczna tomografia międzyotworowa (seismic borehole tomography – SBT) należy do grupy polowych metod seismiki inżynierskiej. Metoda ta polega na sztucznym wytworzeniu fal poprzecznych i podłużnych w ośrodku gruntowym, i rejestracji czasu przejścia fali pomiędzy źródłem a odbiornikami drgań. Zarejestrowany sygnał podlega przetwarzaniu, którego celem jest wskazanie czasu pierwszych wstąpień fal sejsmicznych (fal bezpośrednich poprzecznych i podłużnych), z którego w następnych etapach możliwe jest obliczenie prędkości fali P i S oraz parametrów sprężystych badanego ośrodka gruntowego ( $E$ ,  $\nu$ ,  $G$  i in...)<sup>1</sup>.

Badanie SBT przeprowadza się w dwóch specjalnie zarurowanych otworach, znajdujących się od siebie nie dalej niż 50m. Przygotowanie do wykonania pomiaru polega na umieszczeniu źródła wywołającego fale sejsmiczną w pierwszym otworze, i linii odbiorników fal sejsmicznych w drugim otworze. Pomiar odbywa się od wygenerowania fali sejsmicznej przez źródło, do rejestracji sygnału drgań mechanicznych przez odbiorniki





Badania geofizyki otworowej koncentrują się głównie na określeniu wartości prędkości fali poprzecznej VS oraz prędkości fali podłużnej VP

Wielkości te są niezbędne do obliczenia rozkładu dynamicznych parametrów sprężystych w podłożu badanego obszaru (przekroju). We wzorach podanych w tabeli poniżej istotnym parametrem jest gęstość objętościowa gruntów objętych pomiarami sejsmicznymi.

| Dynamiczny parametr sprężysty                           | Równanie   |
|---|--|
| Moduł Younga $E_{\text{dmax}}$ (MPa)                    | $\rho V_S^2 \cdot \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2}$ |
| Moduł ścinania $G_{\text{dmax}}$ (MPa)                  | $\rho V_S^2$   |
| Współczynnik Poissona $\nu_d$ (-)                       | $\frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}$                |
| Moduł ściśliwości objętościowej $K_{\text{dmax}}$ (MPa) | $\rho \left( V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right)$          |
| Stała Lamego $l$ , (MPa)                                | $\rho (V_P^2 - 2V_S^2)$                                  |

**Godlewski, T., Szczepański, T., 2015.**

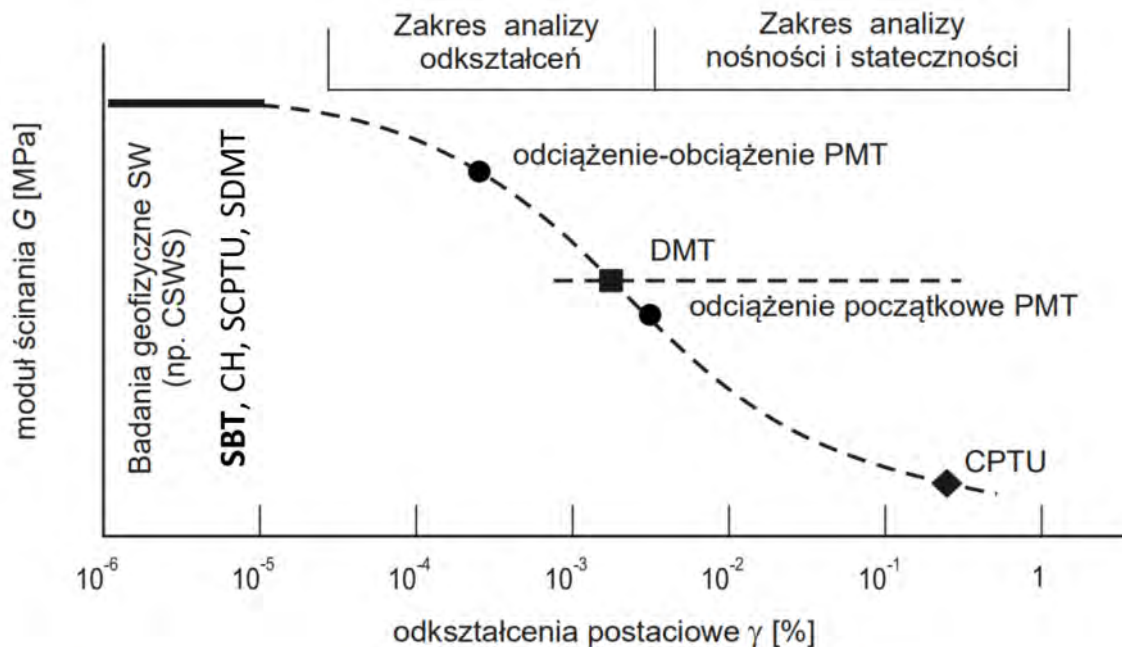
Metody określania sztywności gruntów w badaniach geotechnicznych. Poradnik ITB, Warszawa (in Polish with English summary).

**Godlewski, T., Szczepański, T., Bogusz, W., 2015.**

Stosowalności wybranych metod określania modułu sztywności  $G_0$  gruntów w praktyce geotechnicznej, Inżynieria Morska i Geotechnika, **3**: 371-376 (in Polish).



Metoda badań SBT pozwala na wyznaczenie wartości modułów w zakresie odkształceń sprężystych tj. **odkształceń postaciowych w zakresie  $10^{-6} - 10^{-5} \%$** . Metoda ta należy do grupy metod wykorzystujących pomiary sejsmiczne, a dokładnie pomiar prędkości fal – poprzecznej i podłużnej w warunkach in-situ.



8.

Nieliniowość modułu ścinania w zależności od odkształceń na tle pracy wybranych konstrukcji i różnych metod badawczych

# APARATURA POMIAROWA (HGS sp. z o. o.)



*. Po lewej źródło fali P – sparker SBS42. Po prawej źródło fali S – BIS-SH.*



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



*Po lewej odbiorniki fali P – BHC5. Po prawej odbiorniki fali S – MBAS-D.*



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



DevProbe1

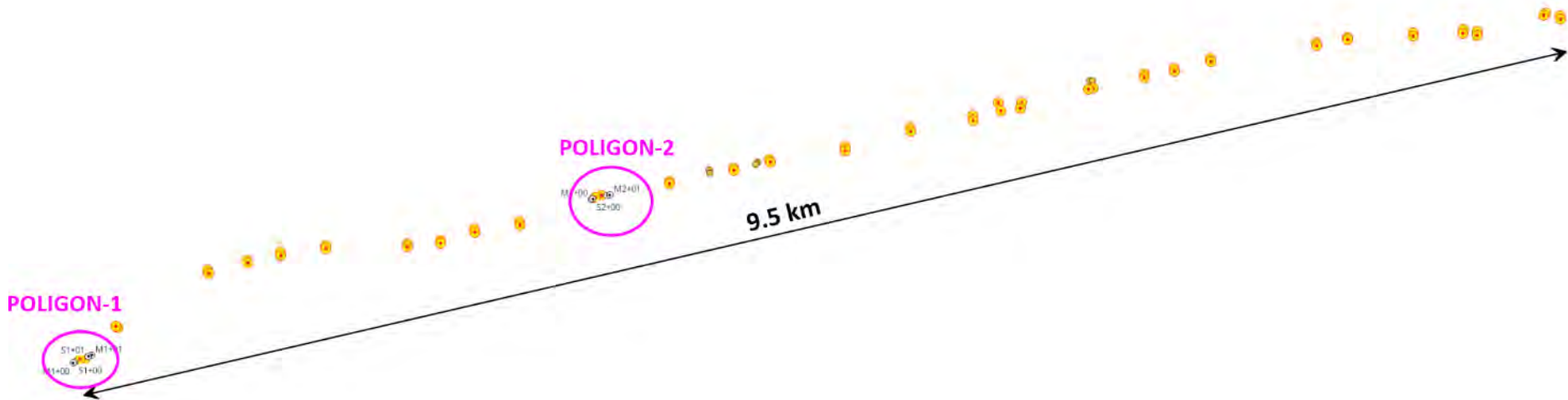


Impulse generator IPG5000 and remote control unit RCU.

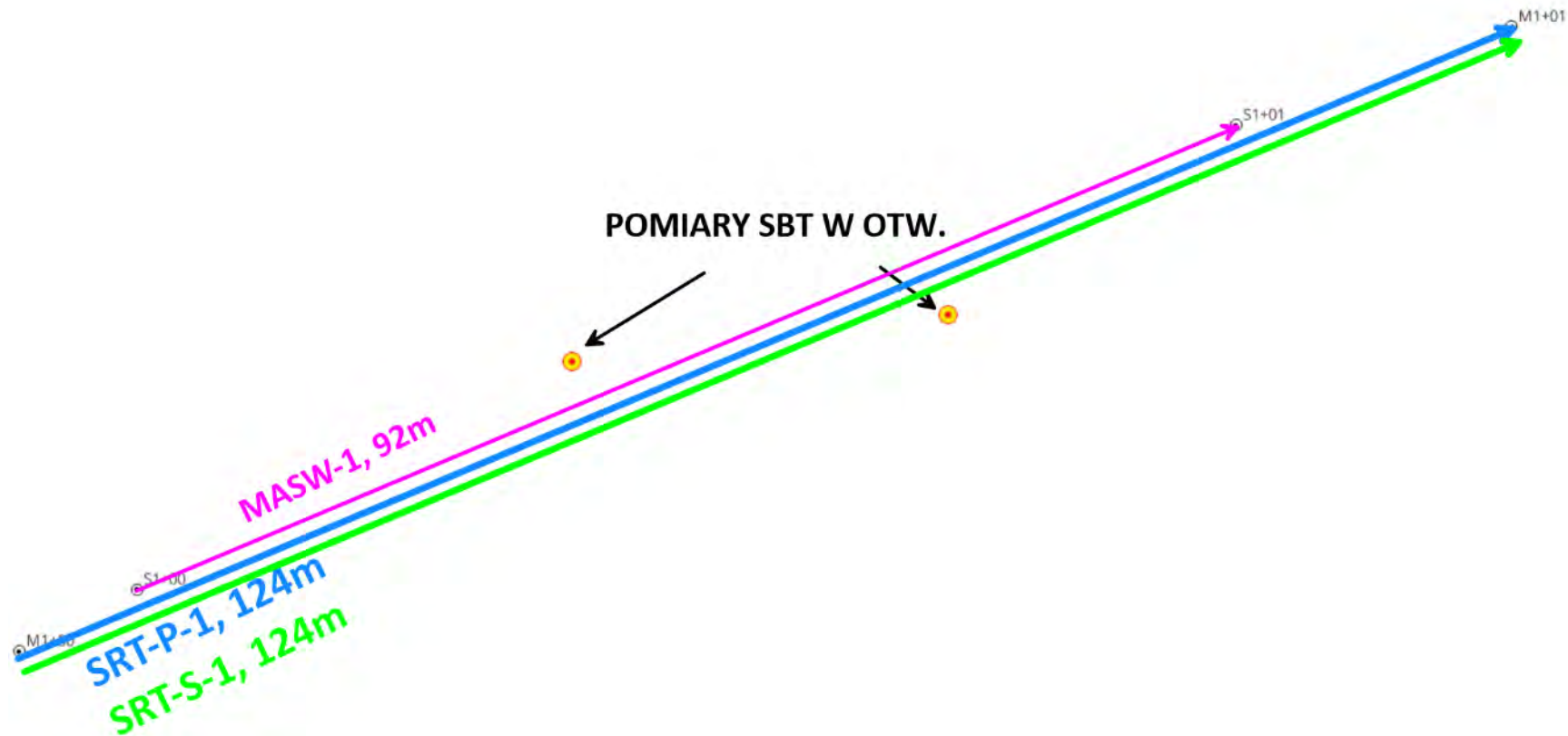
Impulse generator IPG5000  
and remote control unit RCU.



# OBSZAR BADAWCZY



# POLIGON BADAWCZY-1

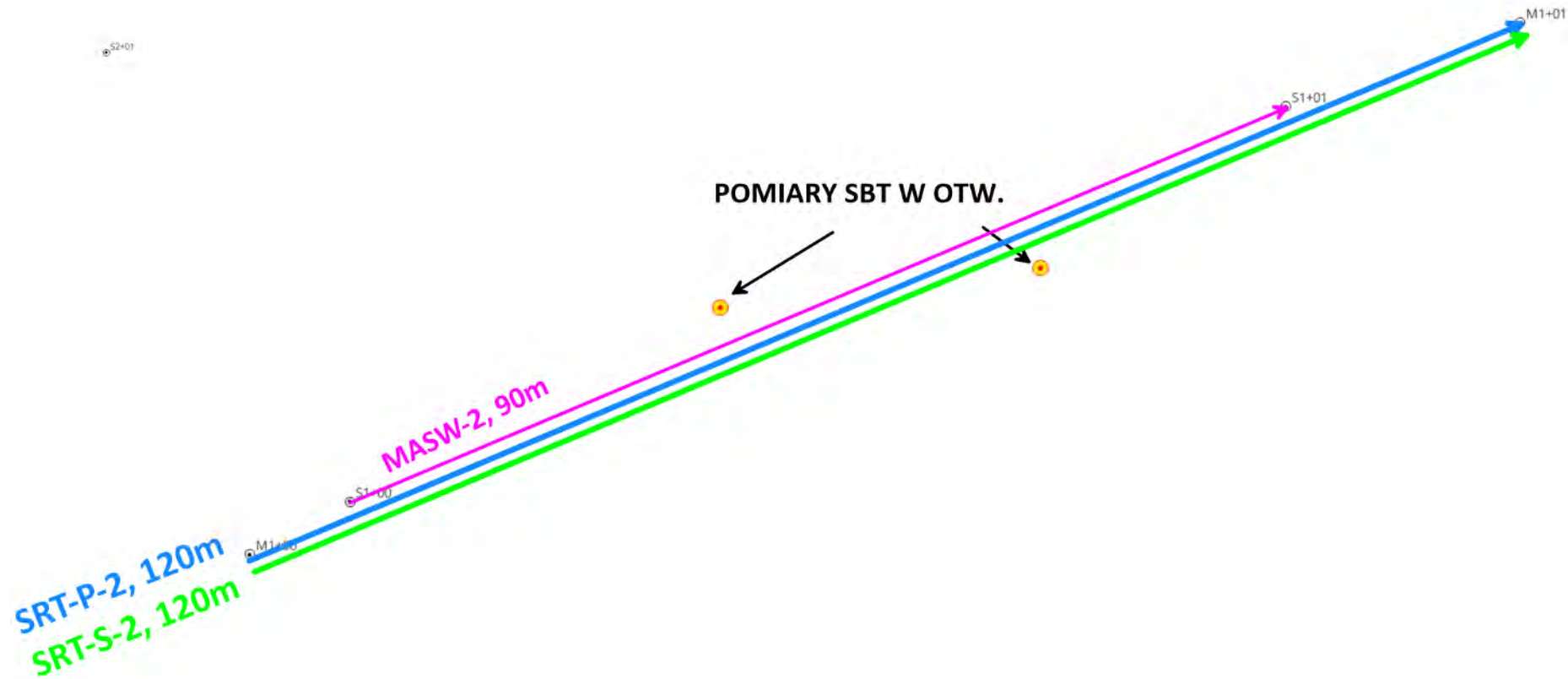


**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

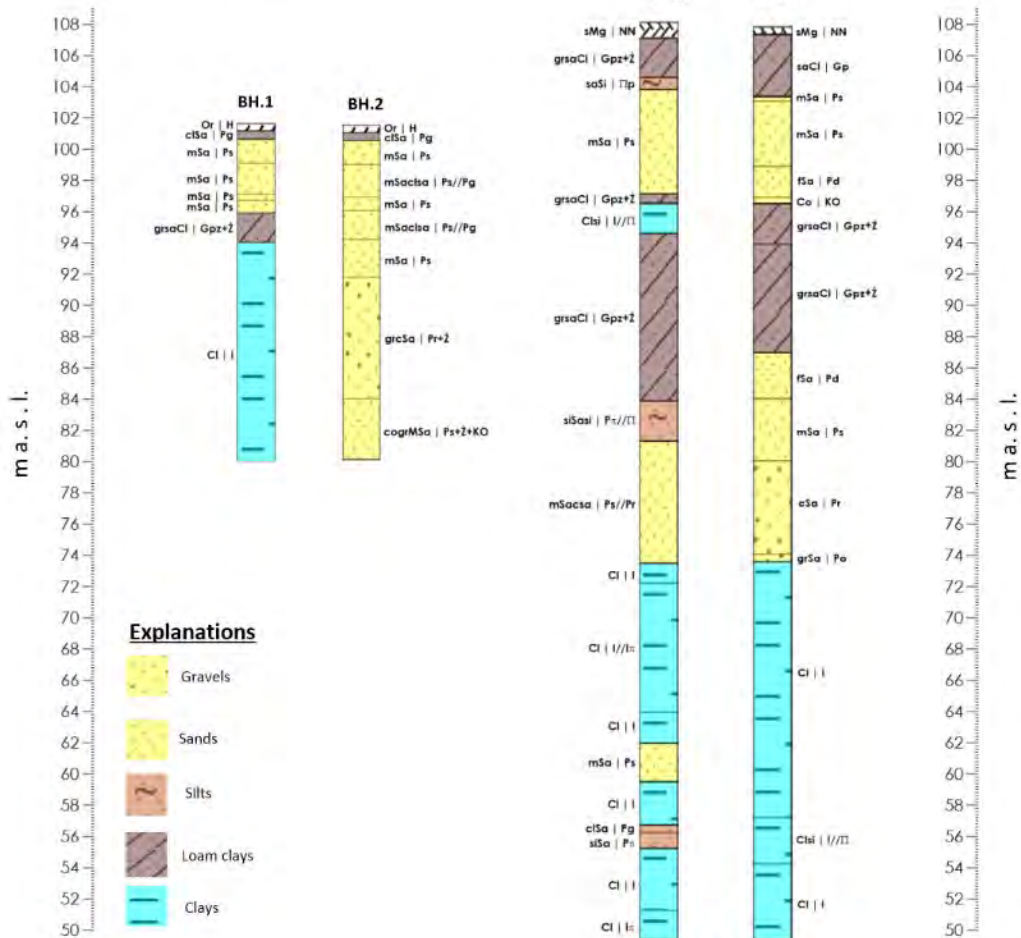
# POLIGON BADAWCZY-2



# BUDOWA GEOLOGICZNA

## POLIGON 1

## POLIGON 2



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# POMIARY W TERENIE



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



2024

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)





**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# REJESTRACJA SYGNAŁU

Aby rejestrować jak najbardziej wyraźny sygnał zastosowano następujące czynności:

- 1) Składanie sygnału, tzw. stackowanie, polegające na powielaniu strzałów w danej pozycji w celu wzmocnienia sygnału użytecznego.
- 2) Odrzucanie zaszumionych, niewyraźnych sejsmogramów lub takich, które uniemożliwiały jednoznaczne wskazanie czasu pierwszego wstąpienia.
- 3) Dostosowywanie parametrów próbkowania i skali amplitudy sygnału oraz długości okna czasowego w zależności od warunków geologicznych, odległości między otworami i typu rejestrowanej fali.
- 4) Dolewanie wody do otworów ze źródłem i hydrofonami w czasie pomiarów fali P.
- 5) Wykonywanie strzału w dwóch pozycjach  $0^\circ$  i  $180^\circ$  w czasie pomiarów fali S.



# POMIARY UZUPEŁNIAJĄCE

1) Pomiary geodezyjne - pomiary koordynat otworów pomiarowych wykonano z wykorzystaniem systemu GNSS-RTK (*ang. Global Navigation Satellite System*) skonfigurowanego do pracy z siecią ASG EUPOS i TOPCON TPI NET w zdefiniowanym układzie współrzędnych CS2000/7 (EPSG: 2178). W terenie zadrzewionym pomiary wykonano metodą tachimetryczną. Pomiary wykonano w dowiązaniu do lokalnej stacji referencyjnej – Warszawa. Zestaw Ruide6.

2) Pomiar krzywizny otworu – pomiary głębokości, odchylenia i azymutu odchylenia otworu wiertniczego zostały wykonane sondą DevProbe1 (*ang. Deviation Probe*). Sonda DevProbe1 posiada trzyosiowy magnetometr mierzący azymutalny kierunek odchylenia otworu wiertniczego oraz podwójny czujnik wychylenia dostarczający informacji o odchyleniu otworu od pionu. Do konfiguracji parametrów pomiaru oraz zapisu wyników wykorzystano program DevLogger| od producenta sondy. Pomiar wykonywany był co 1 metr od poziomu terenu.



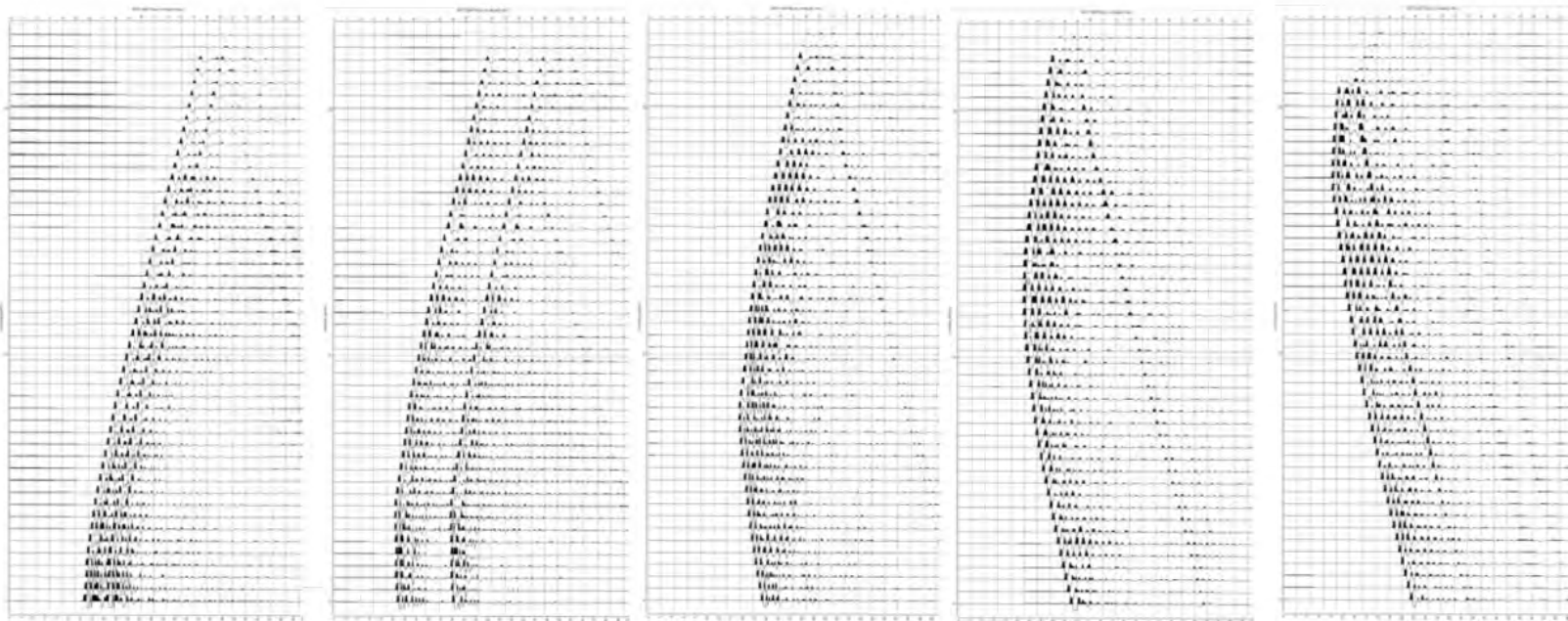
# PRZETWARZANIE SYGNAŁU

Dane z pomiarów SBT przetwarzano następującymi programami, które są dedykowane do przetwarzania danych sejsmicznych w wersji tomograficznej (tabela poniżej):

| I/p | Program         | Cel   |
|-----|-----------------|---|
| 1   | Arkusz Excel    | Obliczenie poprawki na krzywiznę otworu   |
| 2   | SplitMBAS       | Rozdzielenie kanałów sejsmicznych z uzyskanych badań fal poprzecznych   |
| 3   | CrossOverPlot   | Nakładanie sygnału kanałów sejsmicznych z badań fal poprzecznych z ustawienia $0^\circ$ i $180^\circ$ , w celu dokładnego wskazania czasu pierwszego wstąpienia fali S. |
| 4   | ReflexW 2DQuick | Czasowanie pierwszych wstąpień fal sejsmicznych   |
| 5   | TomoCheck       | Kontrola wprowadzonej geometrii oraz czasów pierwszych wstąpień   |
| 6   | GeoTomCG        | Modelowanie prędkości i położenia promieni fal sejsmicznych   |
| 7   | Arkusz Excel    | Obliczenia wartości parametrów sprężystych  |
| 8   | Surfer          | Wizualizacja wyników modelowania  |



# SEJSMOGRAMY – FALE P

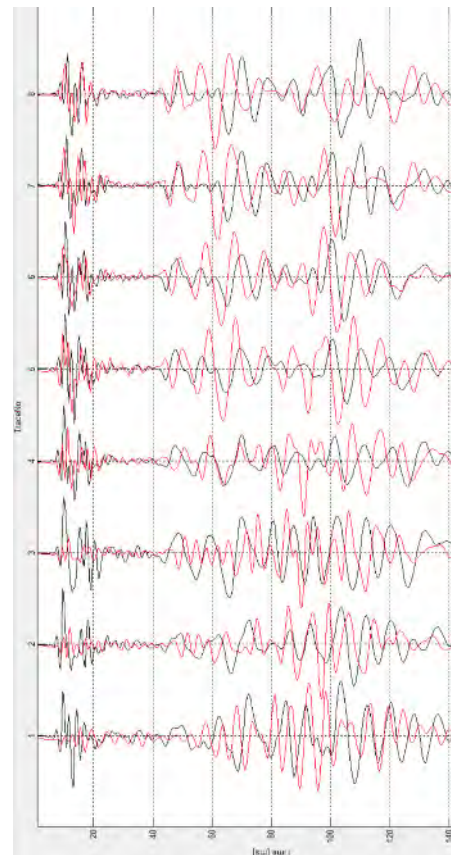
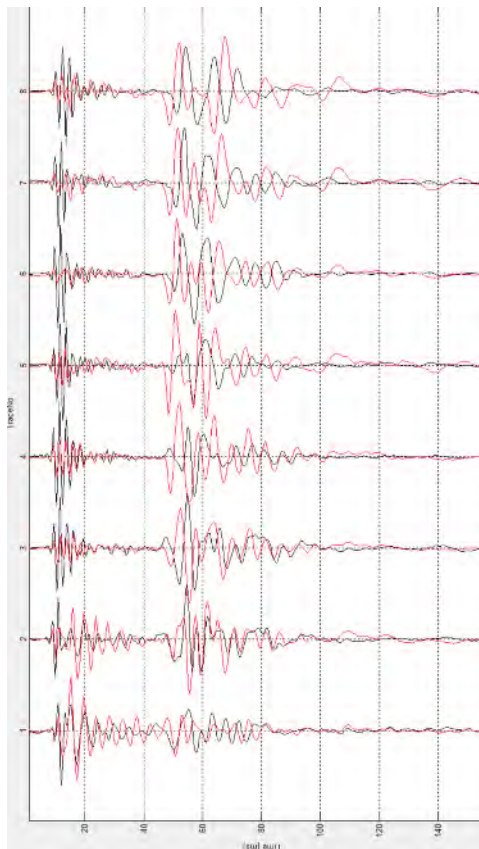


**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# SEJSMOGRAMY – FALE S

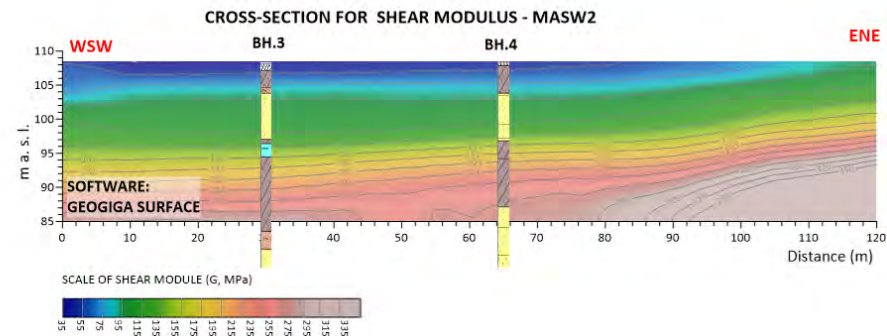
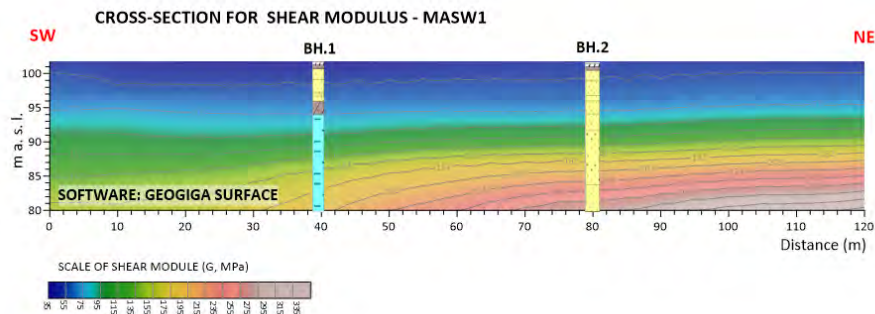
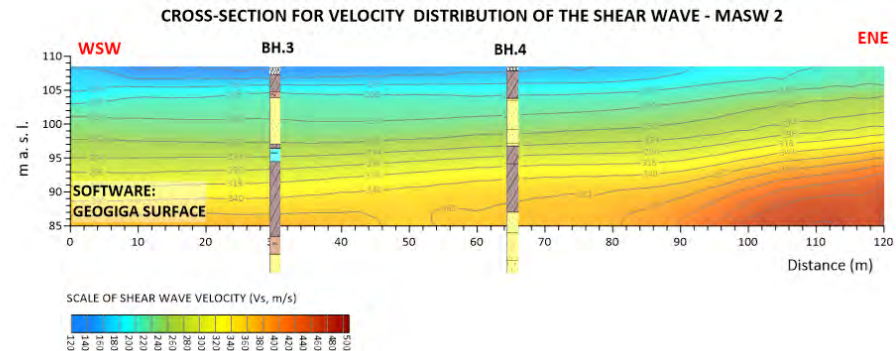
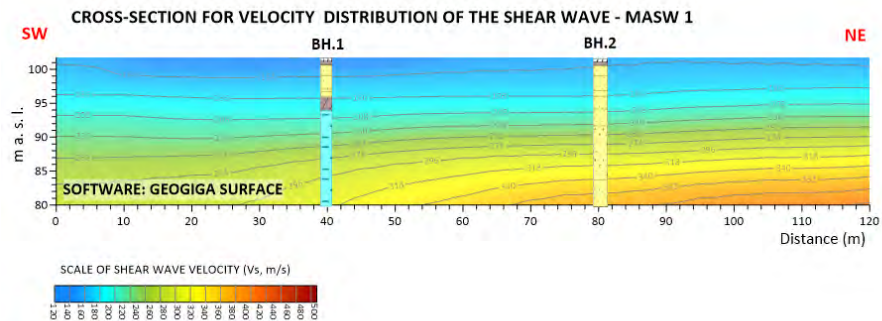


**8.WPGI 2024**

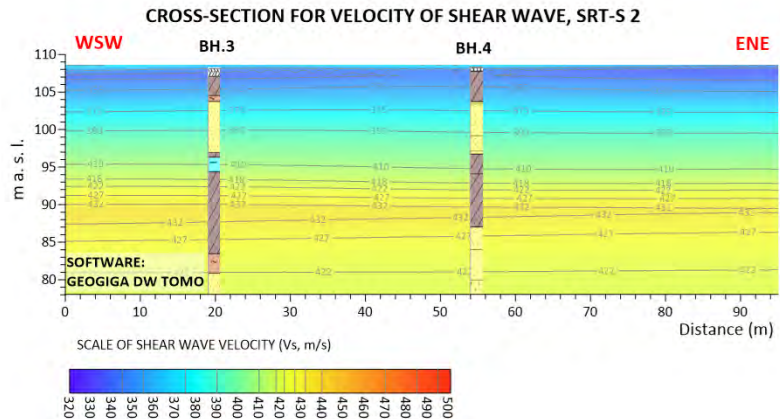
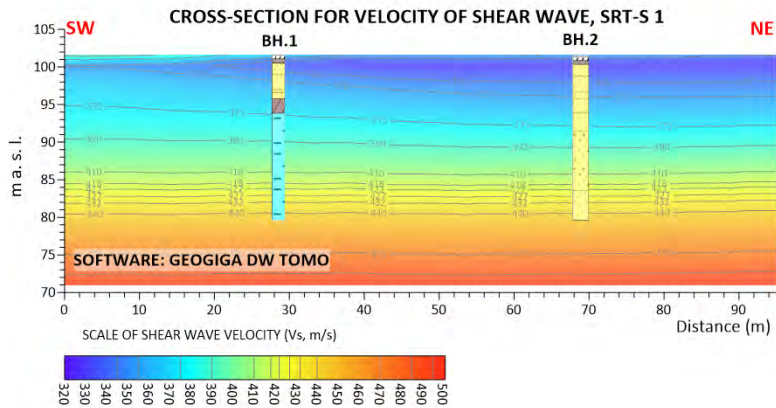
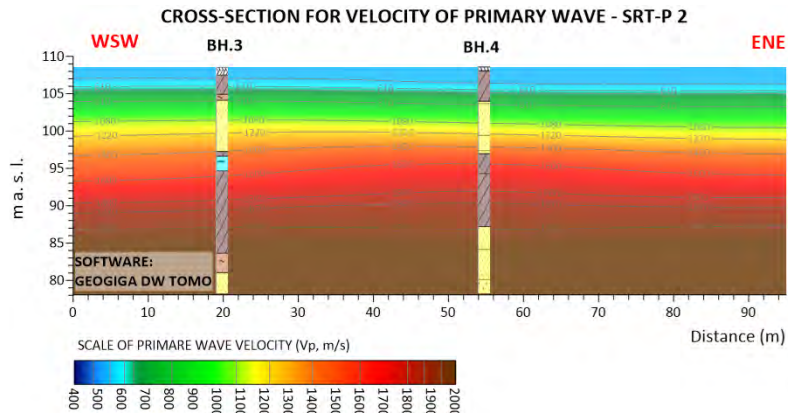
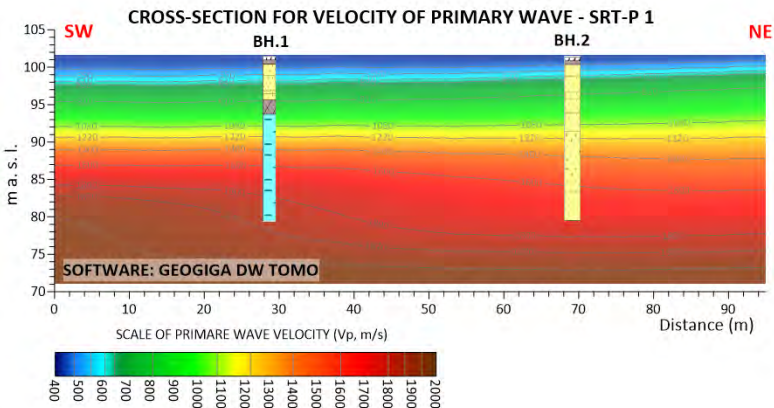
[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

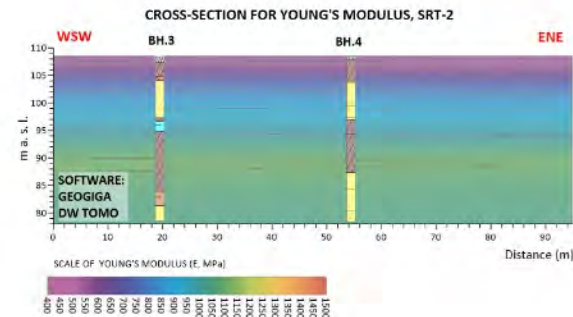
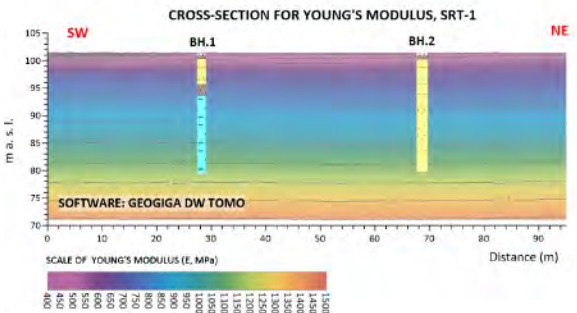
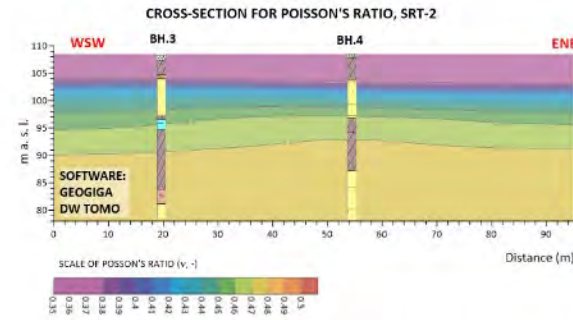
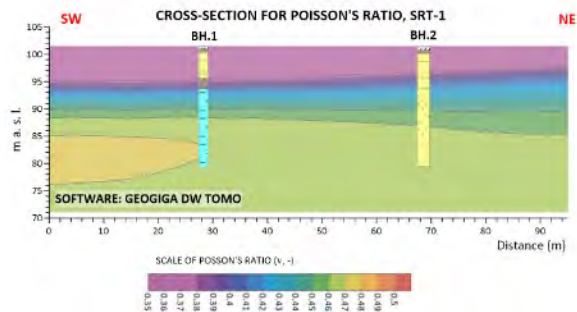
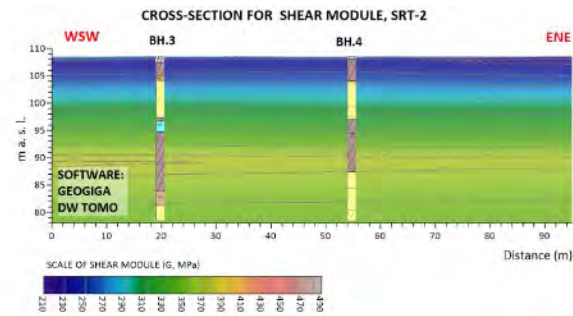
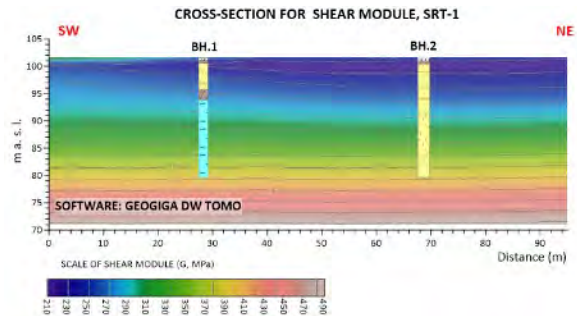
# WYNIKI – SEJSMIKA POWIERZCHNIOWA MASW



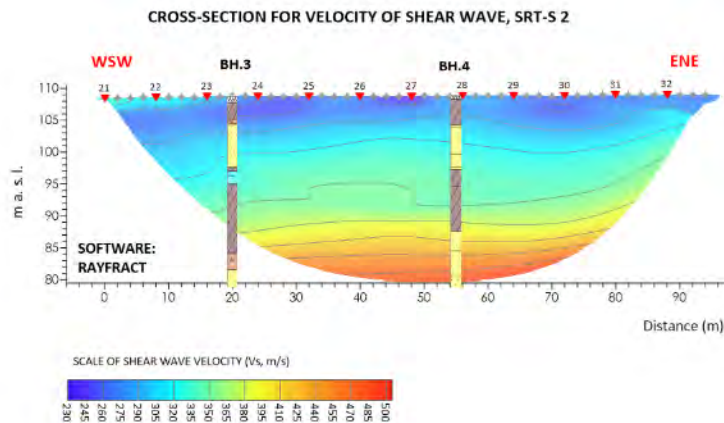
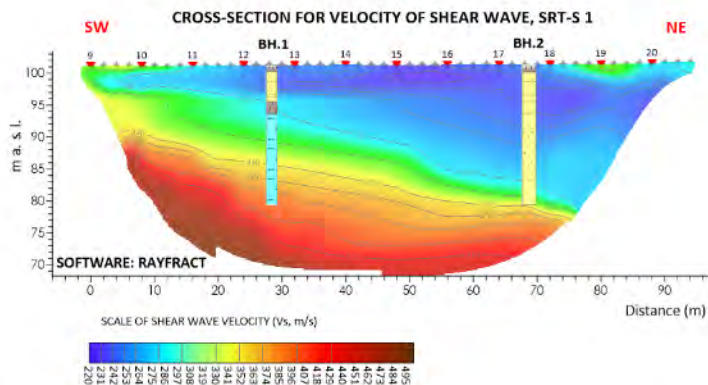
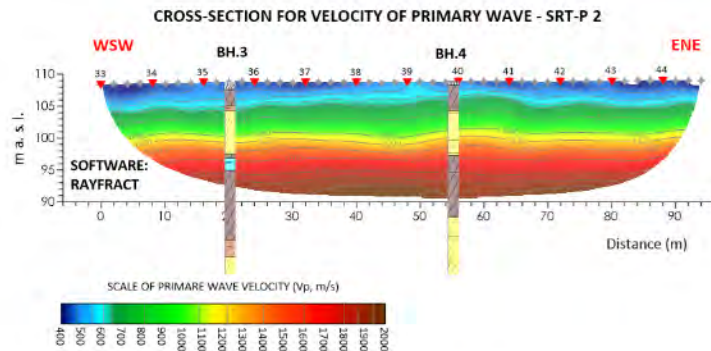
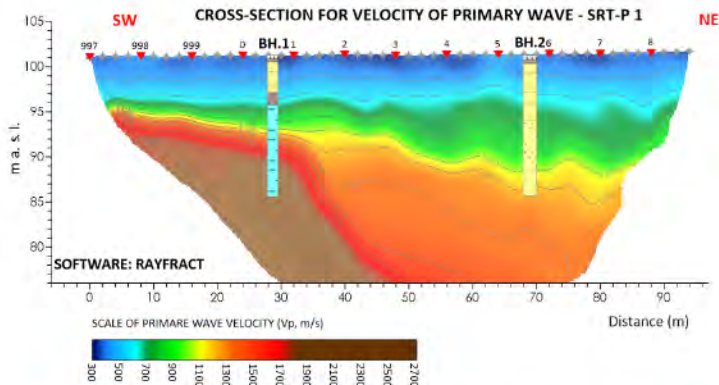
# WYNIKI – SEJSMIKA POWIERZCHNIOWA SRT-P, SRT-S



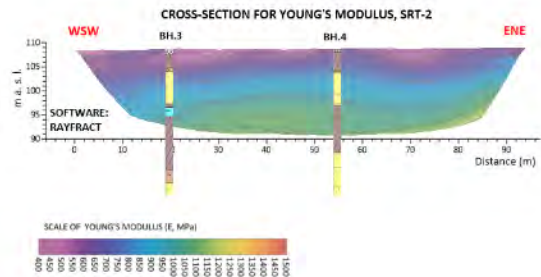
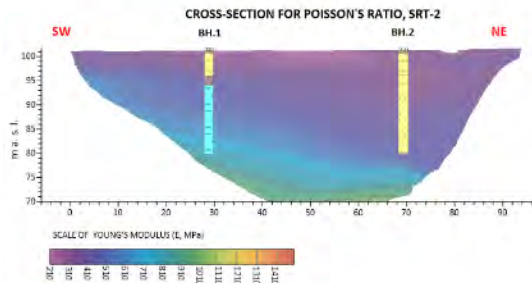
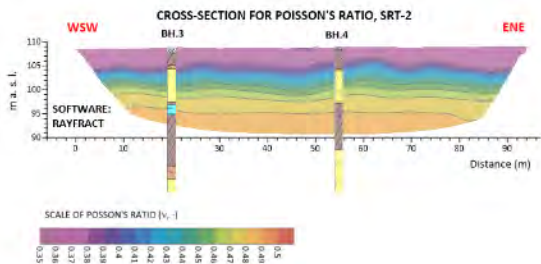
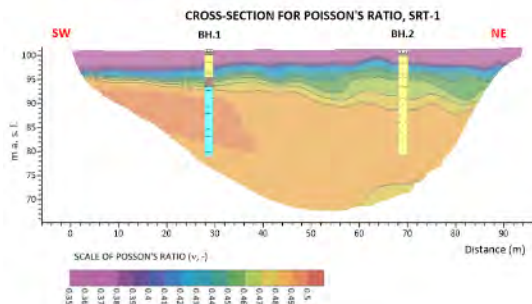
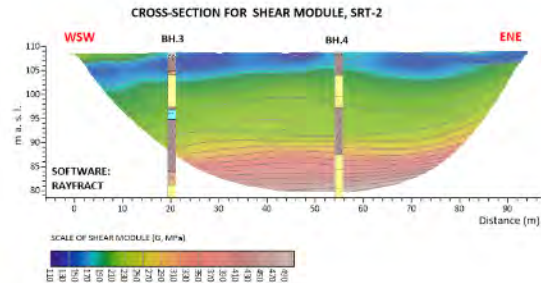
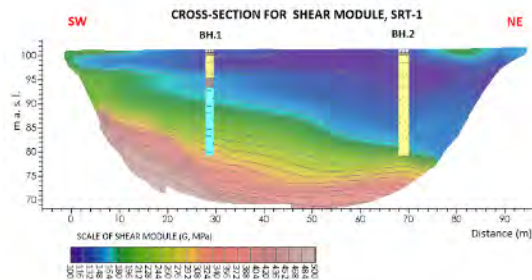
# WYNIKI – SEJSMIKA POWIERZCHNIOWA PARAMETRY E, G, $\nu$



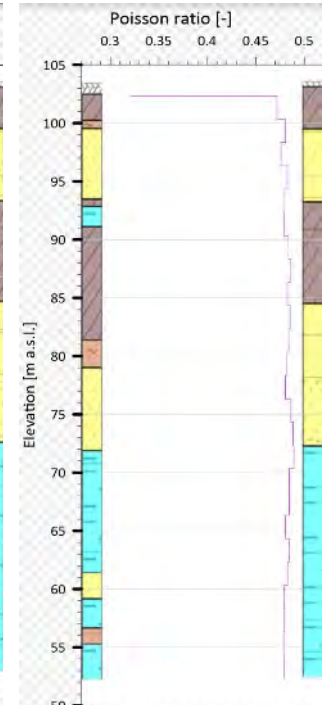
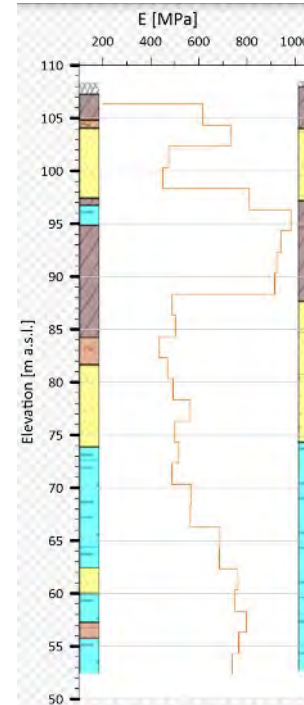
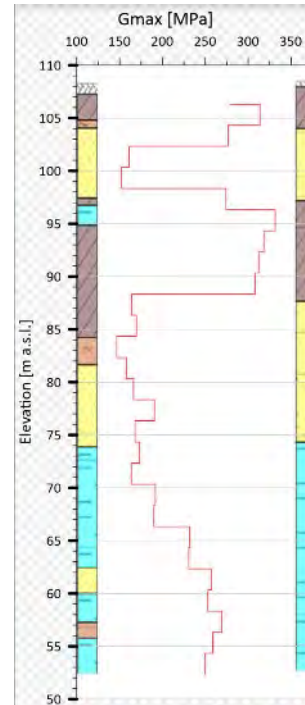
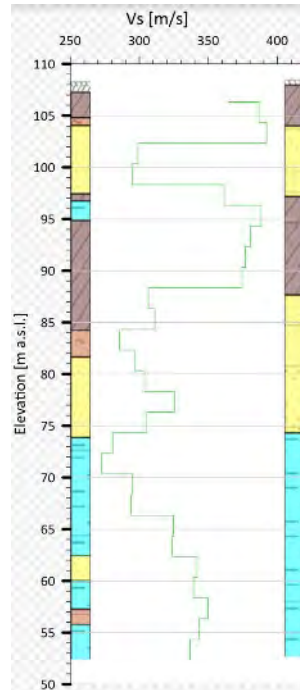
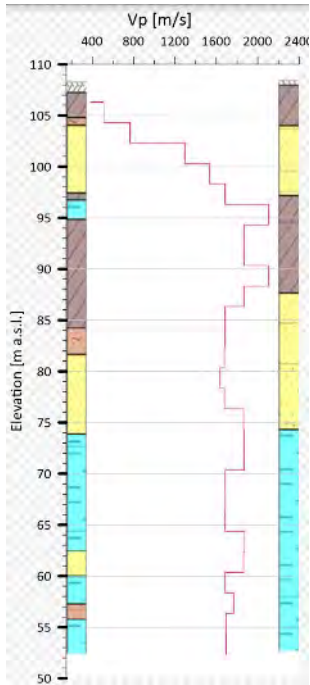
# WYNIKI – SEJSMIKA POWIERZCHNIOWA SRT-P, SRT-S



# WYNIKI – SEJSMIKA POWIERZCHNIOWA PARAMETRY E, G, $\nu$



# POMIARY W OTWORACH TYPU CROSSHOLE

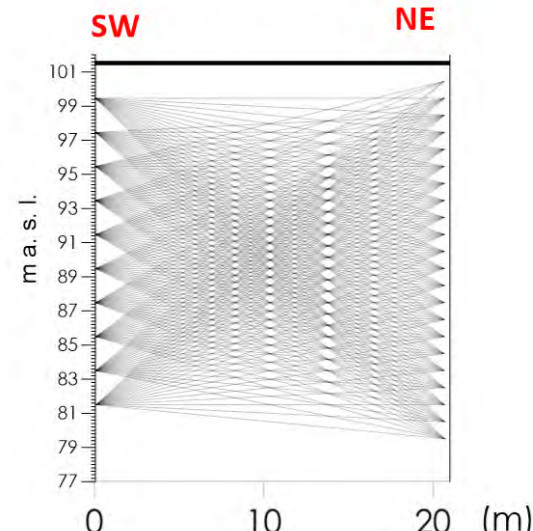
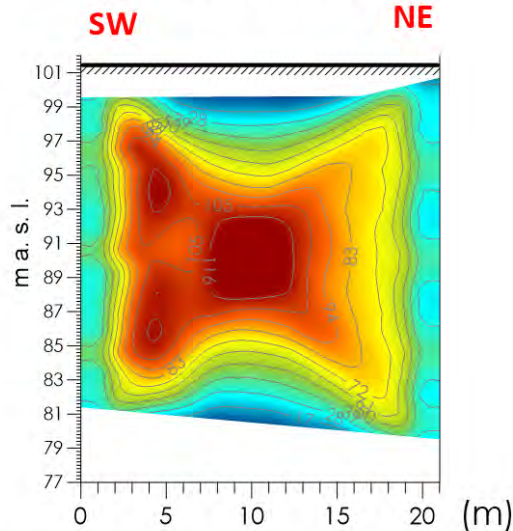
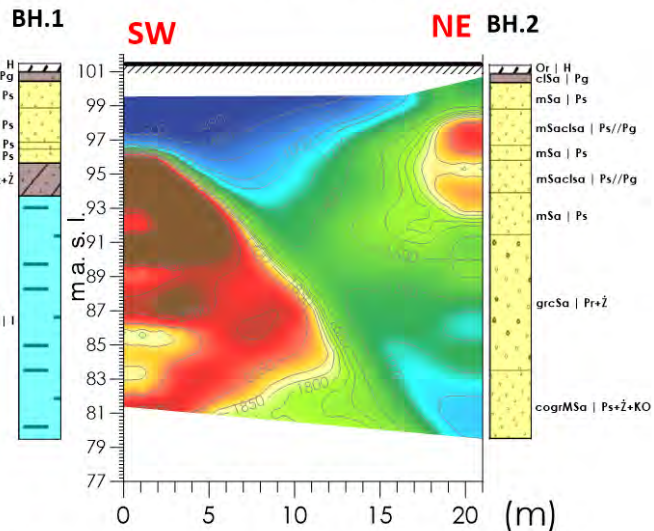


# WYNIKI POMIARÓW METODĄ SBT – POLIGON 1

## CROSS-SECTION FOR VELOCITY OF PRIMARY WAVE SBT-1

## Ray density P-wave seismic

## Ray distribution P-wave seismic



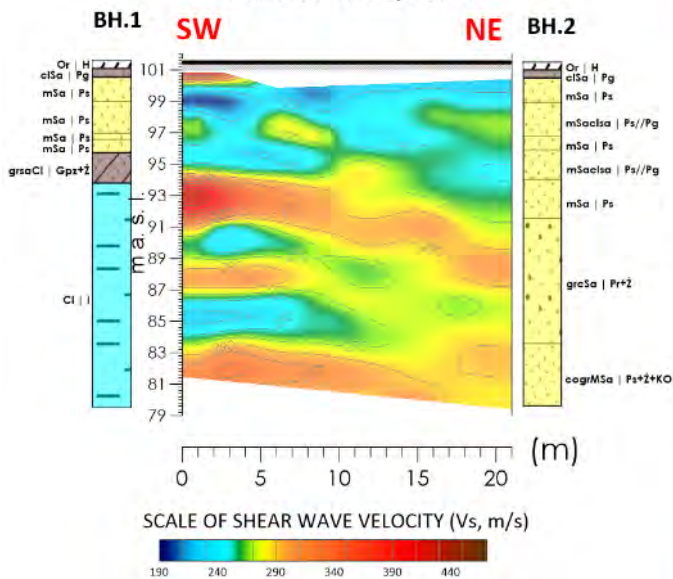
**8.WPGI 2024**

wpgi.pgi.gov.pl

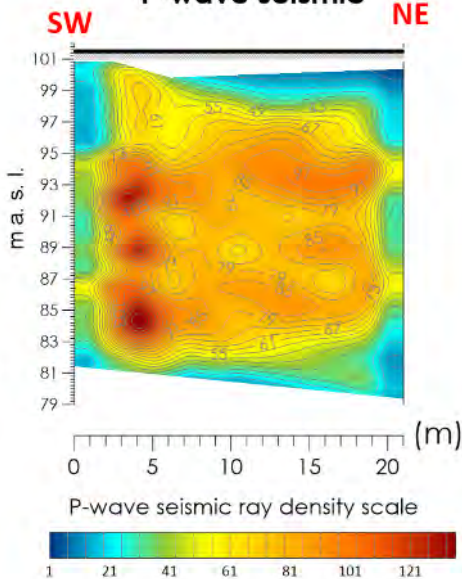
pgi.gov.pl

# WYNIKI POMIARÓW METODĄ SBT – POLIGON 1

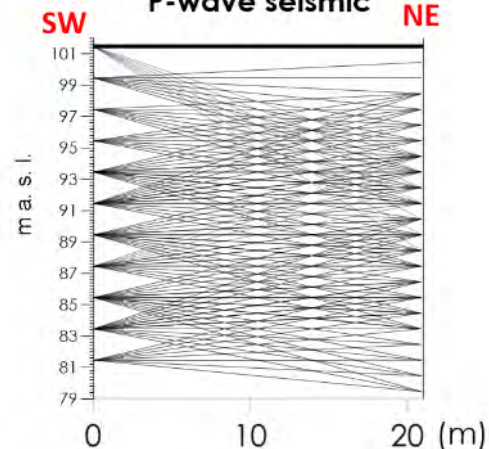
CROSS-SECTION FOR VELOCITY  
OF SHEAR WAVE, SBT-1



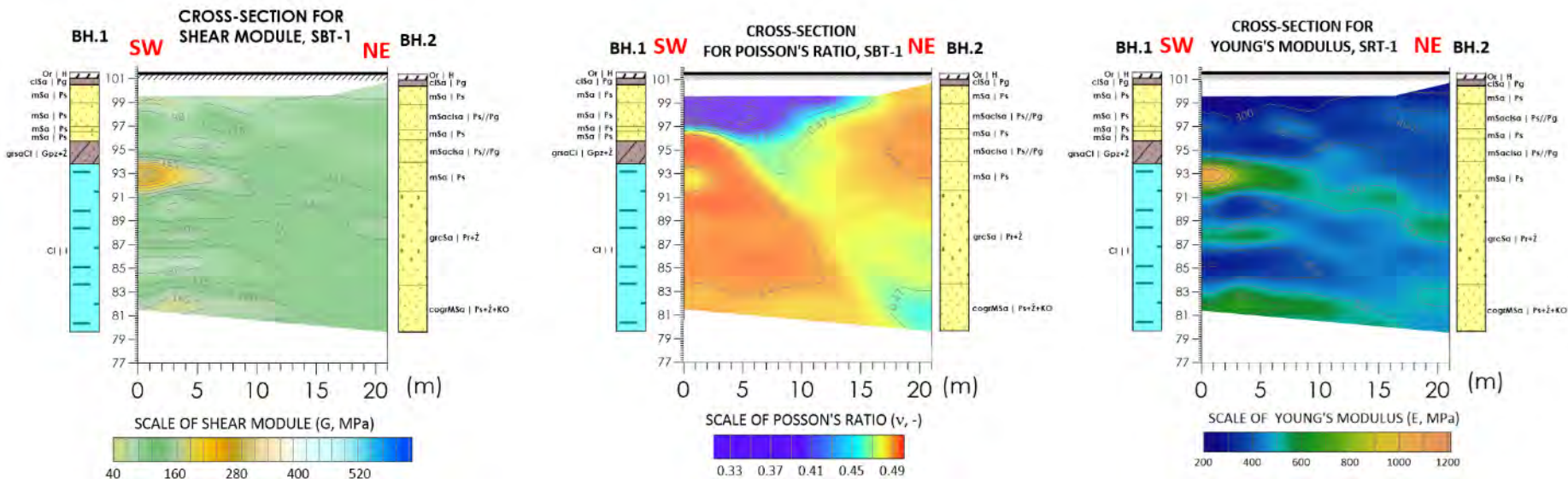
Ray density  
P-wave seismic



Ray distribution  
P-wave seismic

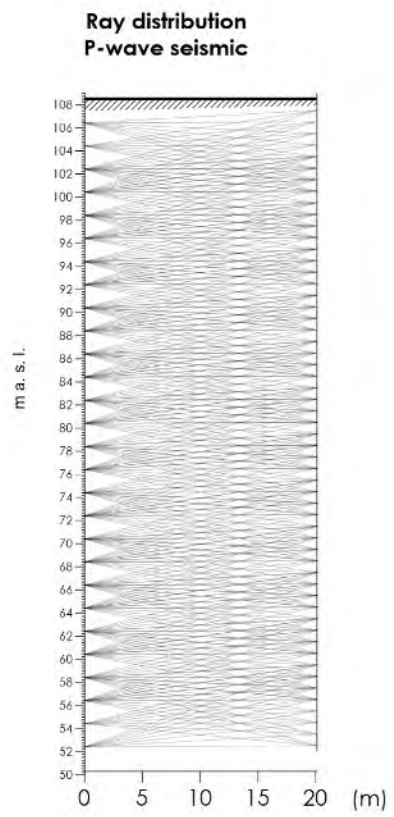
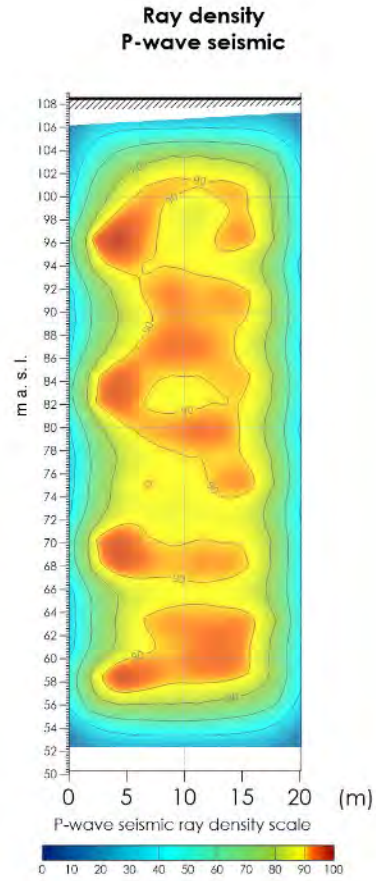
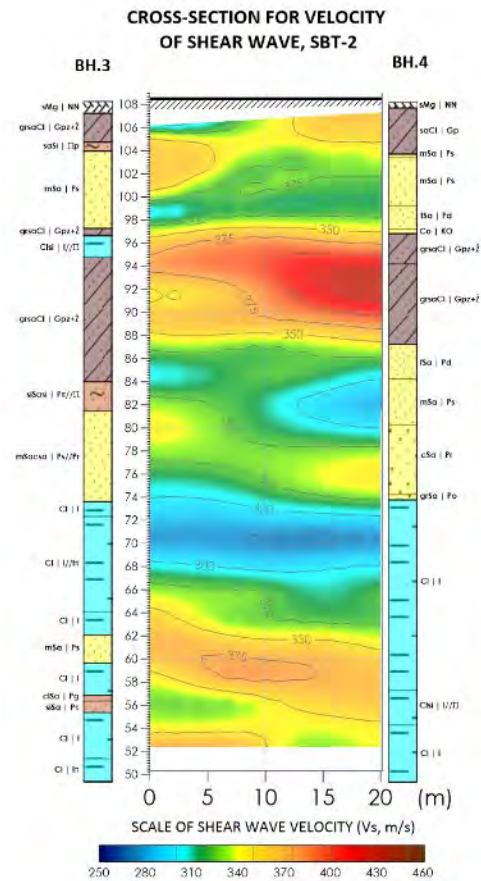


# WYNIKI POMIARÓW METODĄ SBT – POLIGON 1





# WYNIKI POMIARÓW METODĄ SBT - POLIGON 2

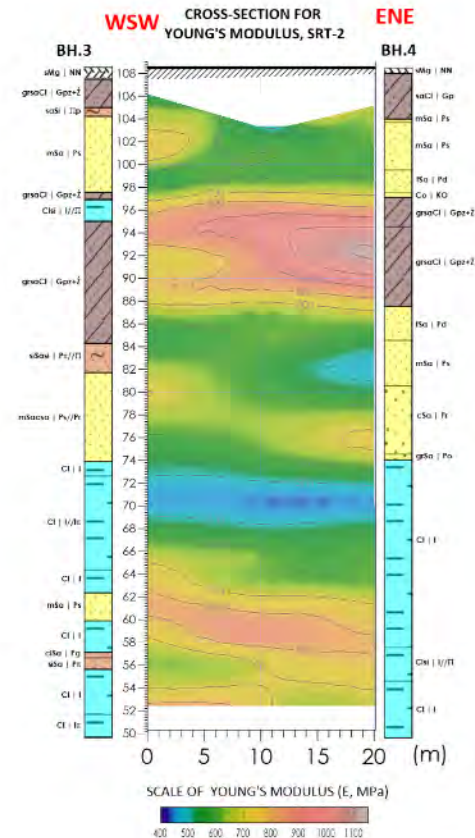
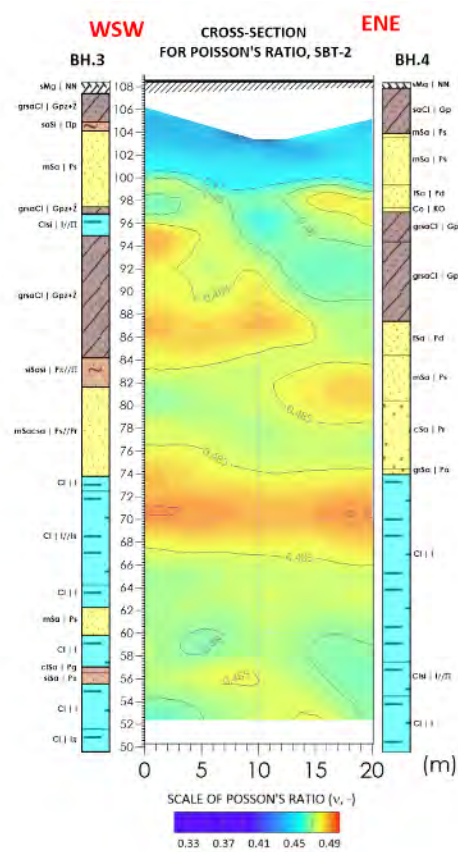
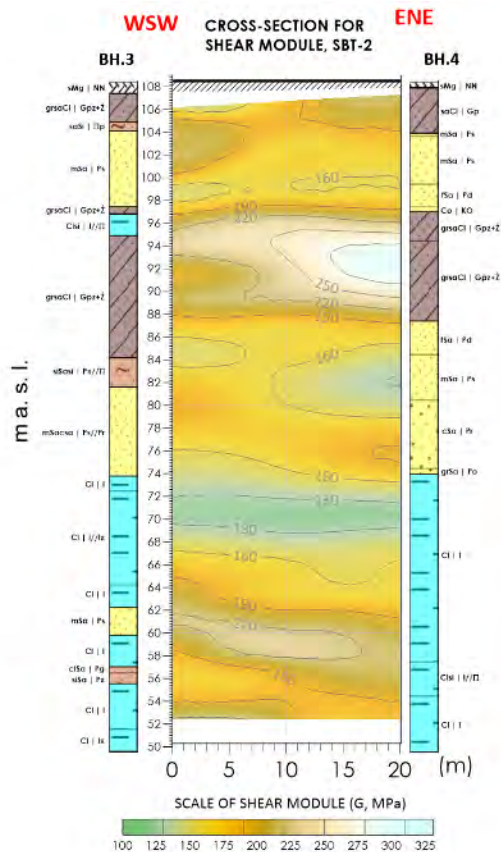


**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

# WYNIKI POMIARÓW METODĄ SBT - POLIGON 2



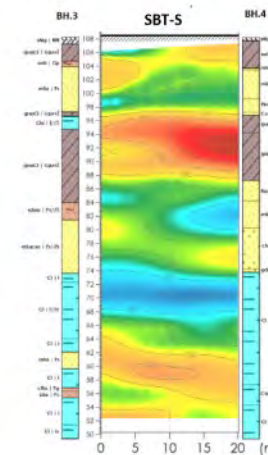
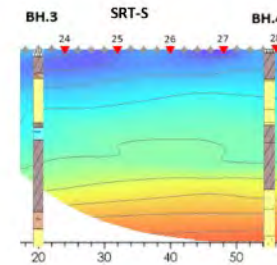
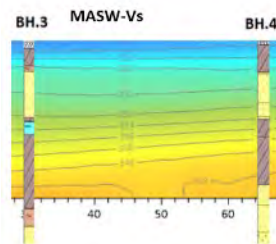
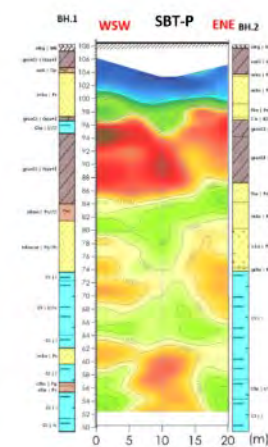
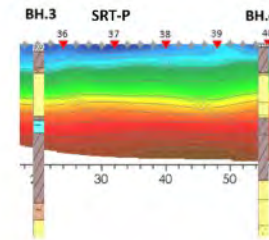
**8.WPGI 2024**

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)



# PORÓWNANIE METOD MASW-SRT-SBT, POLIGON2



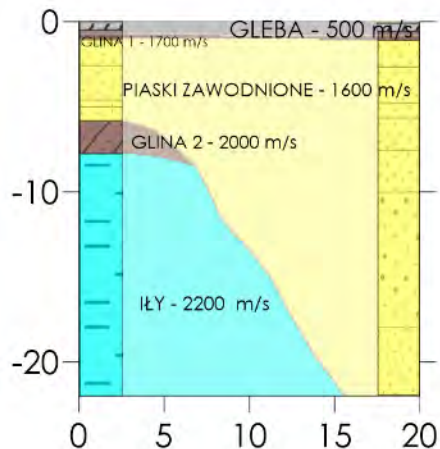
8. WPGI 2024

wpgi.pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

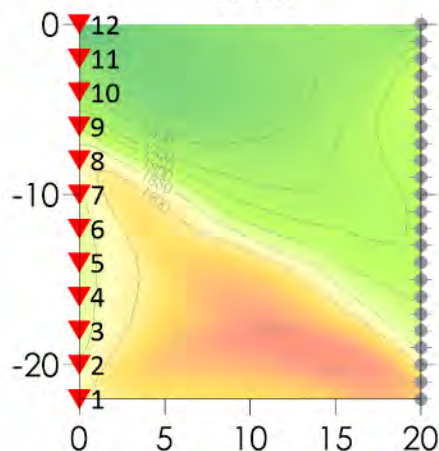
# MODELOWANIE $V_p$ - WERYFIKACJA POMIARÓW SBT

## MODEL GEOLOGICZNY

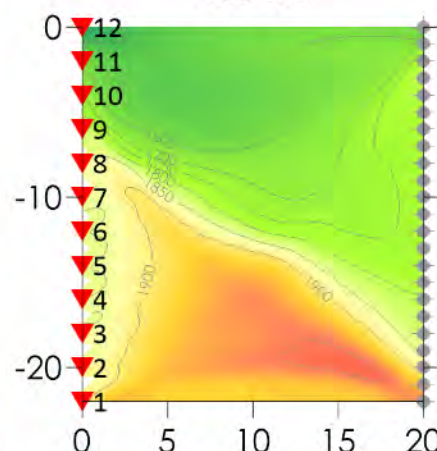


## Rozkład prędkości fali P

### 50 Hz



### 400 Hz

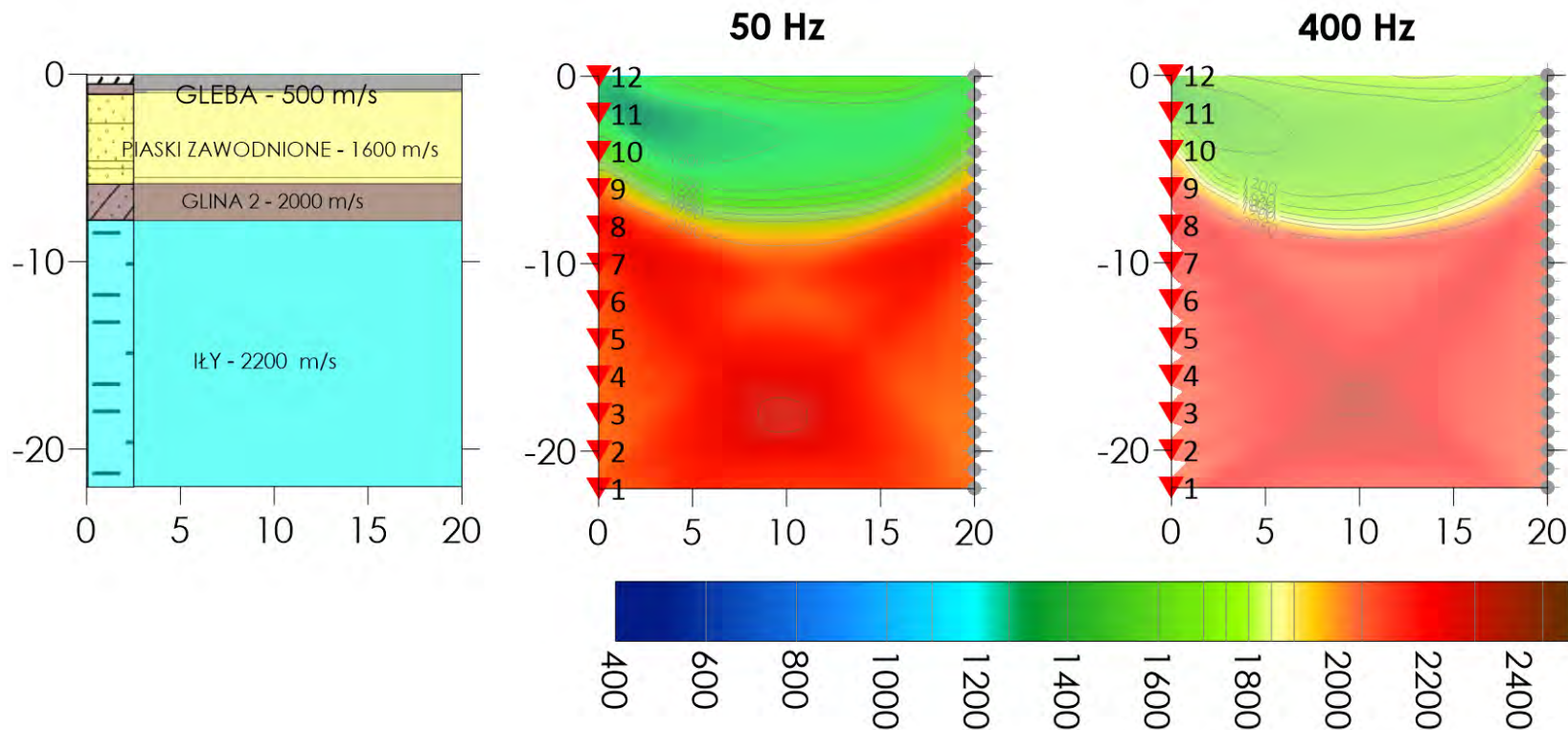


8. WPGI 2024

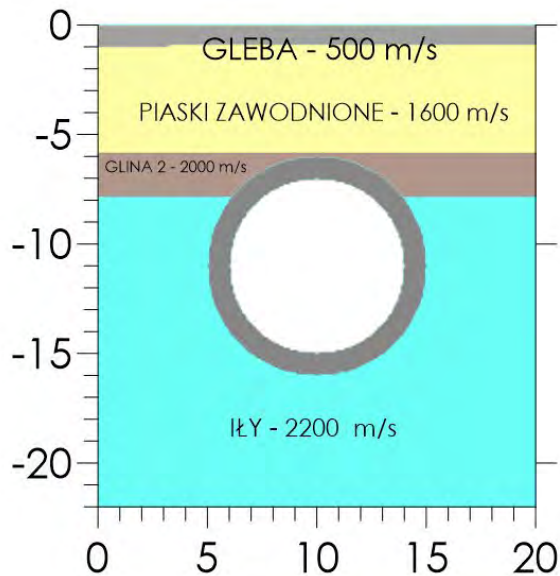
[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

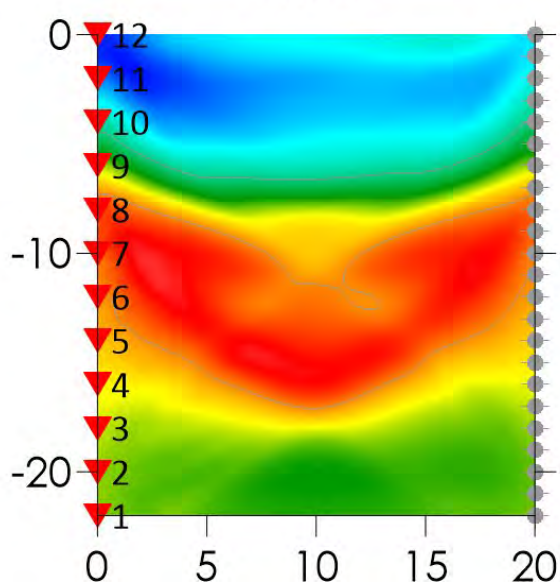
# MODELOWANIE $V_p$ - WERYFIKACJA POMIARÓW SBT



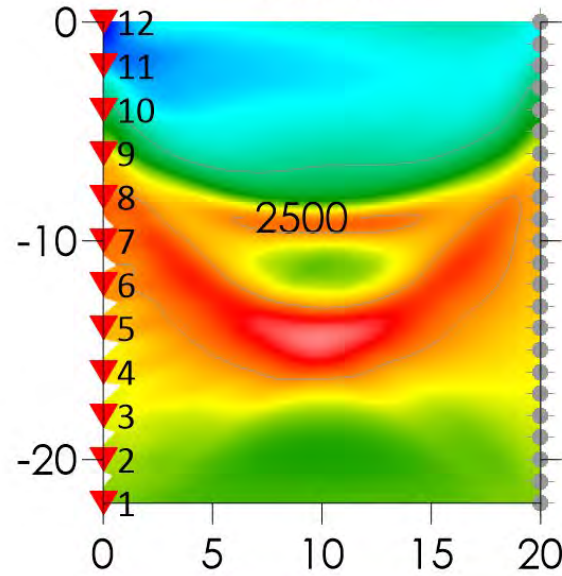
# MODELOWANIE $V_p$ - WERYFIKACJA POMIARÓW SBT



50 Hz



400 Hz

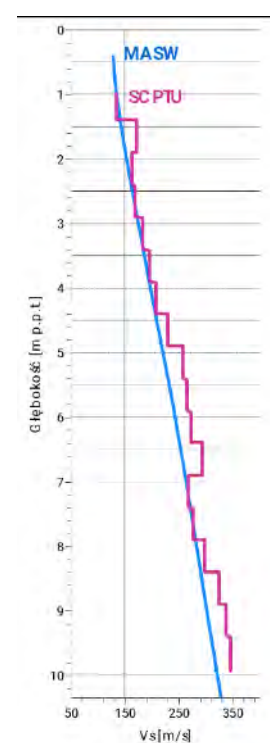
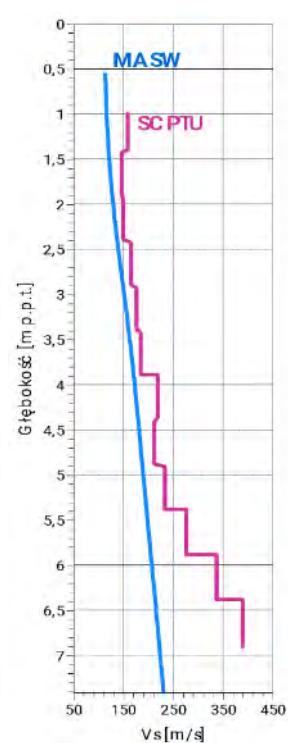
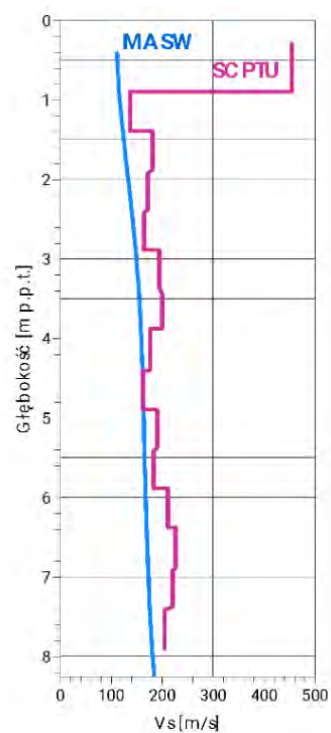
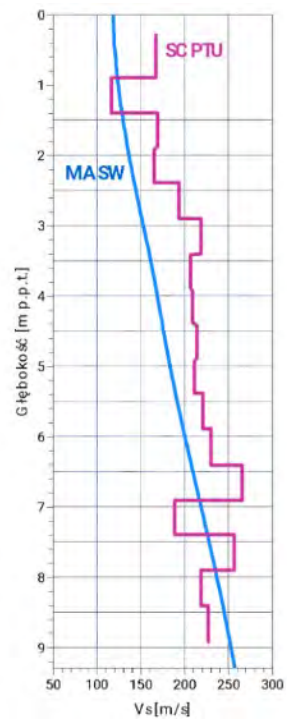
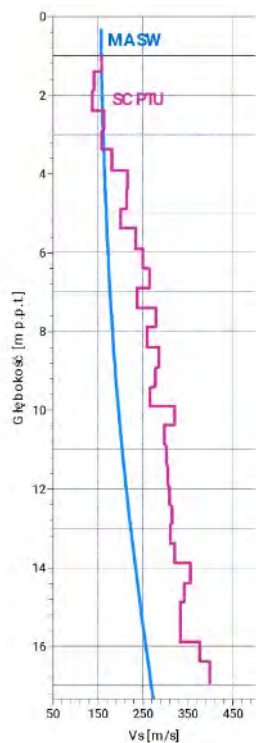
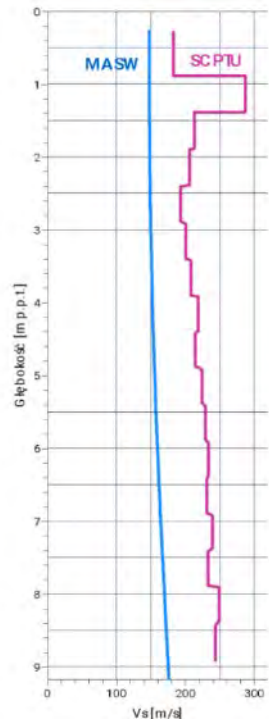


8. WPGI 2024

wpgi.pgi.gov.pl

pgi.gov.pl

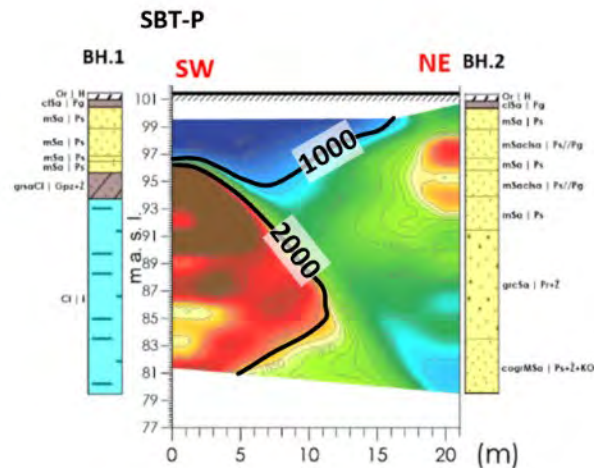
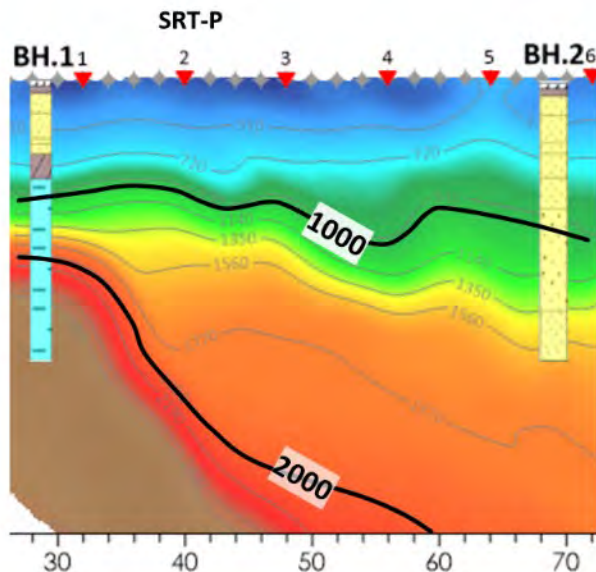
# PORÓWNANIE MASW Vs - SCPTU



# PODSUMOWANIE

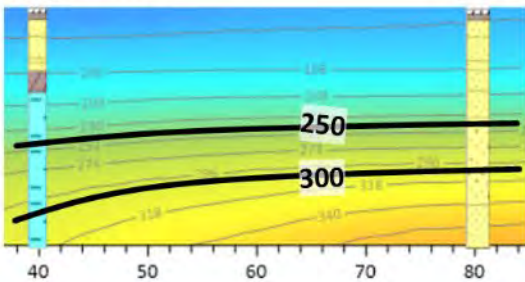
- Porównanie rozkładów prędkości fal P i S uzyskanych z pomiarów sejsmiki powierzchniowej i otworowej wskazuje, iż wartości  $V_p$  i  $V_s$  uzyskane z metod MASW i SRT są niższe od wartości  $V_p$  i  $V_s$  otrzymane z pomiarów SBT

## POLIGON-1, $V_p$

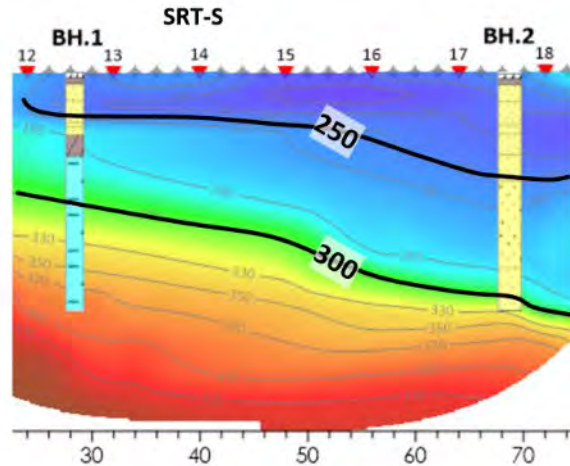


# POLIGON-1, Vs

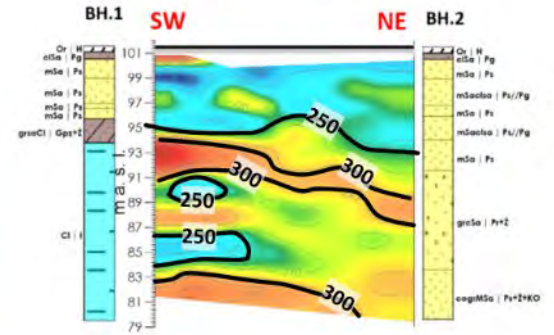
BH.1 MASW-Vs



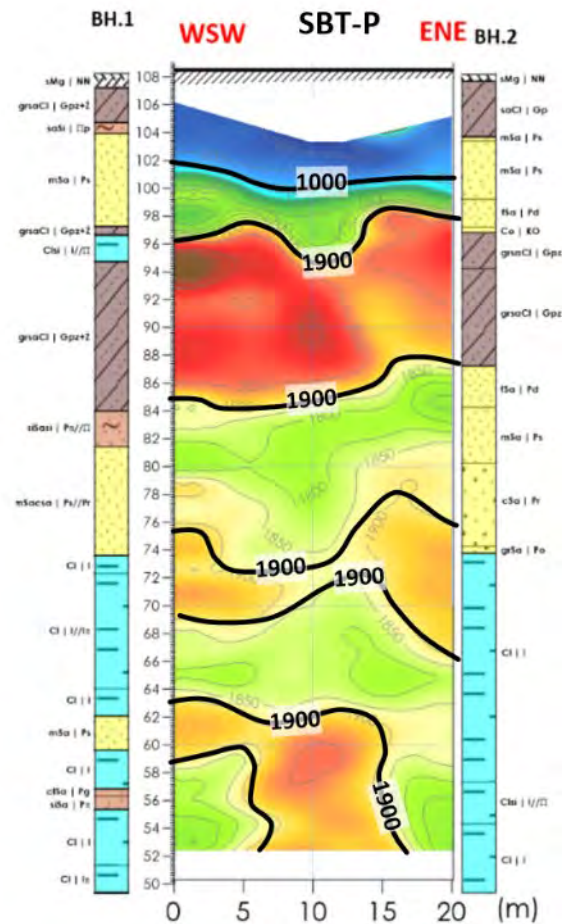
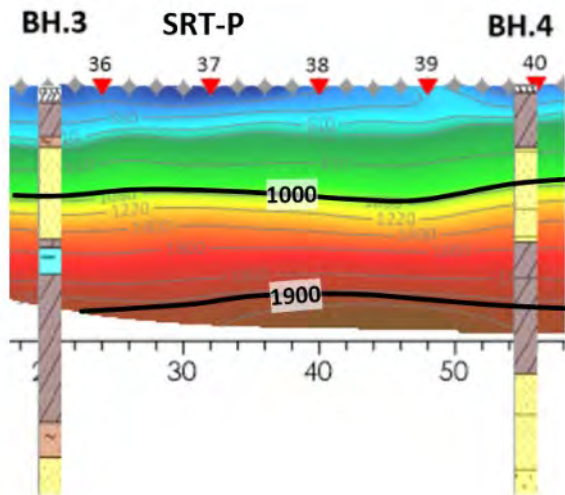
BH.2



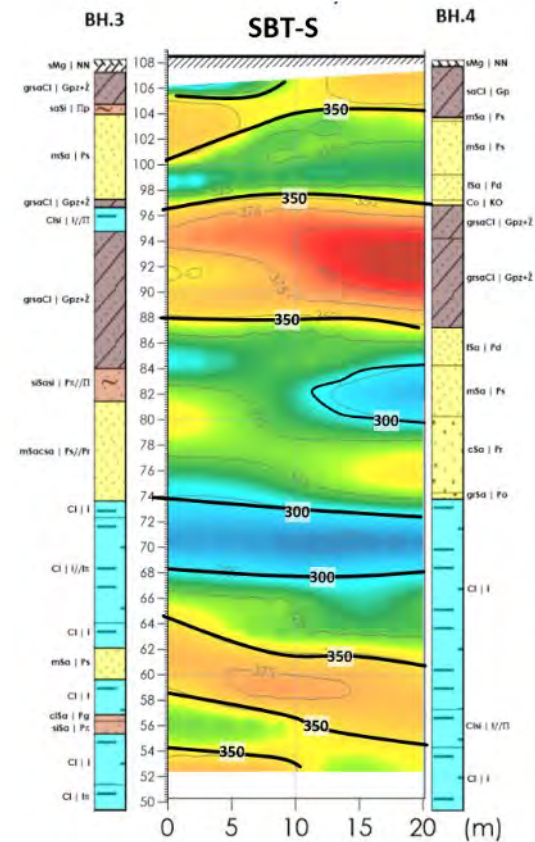
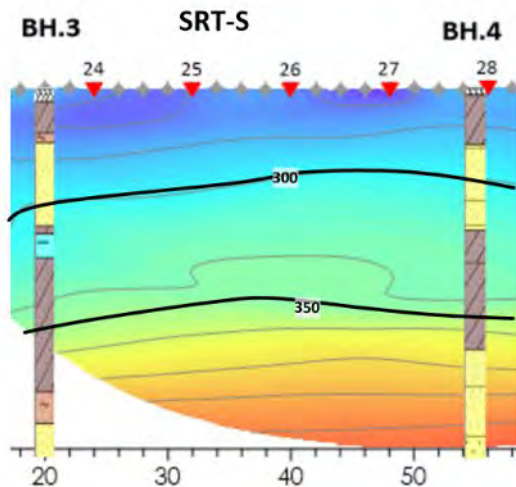
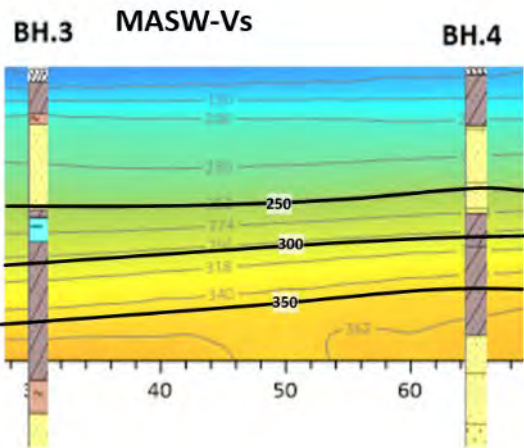
SBT-S



# POLIGON-2, Vp



# POLIGON-2, Vs



# 8.WPGI

# 2024

## PODZIĘKOWANIE

Wielkie uznanie i szacunek autorzy niniejszej prezentacji mają dla osób, które brały udział w konsultacjach, pomiarach, przetwarzaniu i interpretacji przedstawionych rezultatów badań sejsmicznych:

**RMTERRA sp. z o. o.** Gabriel Kurczewski, Konrad Bielecki, Jacek Jaworski, Anna Płoska, Jan Eldring, Wojciech Smoliński, Mateusz Sierański, Andrzej Mieszkowski, Piotr Mieszkowski, Grzegorz Mieszkowski, Aleksander Laszczyk,

**HGS sp. z o. o.** Martyna Kulczyńska, Tomasz Chada,

**Geotomographie GmbH** Thomas Fechner, Rochus Mobil

**GEOSPECTRUM sp. z o. o.** Jerzy Kłosiński



# 8.WPGI 2024

[wpgi.pgi.gov.pl](http://wpgi.pgi.gov.pl)

[pgi.gov.pl](http://pgi.gov.pl)

