

**„Analiza stateczności terenu osuwiskowego w strefie  
ekonomicznej w miejscowości Andrychów  
na podstawie geofizycznych badań sejsmicznych  
i archiwalnych badań geotechnicznych”**

**miejscowość:** Andrychów  
**gmina:** Andrychów  
**powiat:** wadowicki  
**województwo:** małopolskie  
**zamawiający:** Gmina Andrychów  
ul. Rynek 15  
34-120 Andrychów

**OPRACOWALI:**

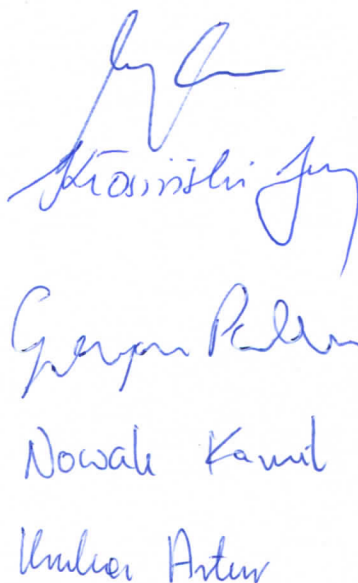
mgr inż. Adam Baranowski

mgr inż. Jerzy Kłosiński  
upr. geolog. MŚ X-0221

mgr inż. Grzegorz Palka  
upr. geolog. MŚ VII-1529

mgr inż. Kamil Nowak

inż. Artur Krukar



Baranowski Adam  
Kłosiński Jerzy  
Palka Grzegorz  
Nowak Kamil  
Krukar Artur

## Spis treści

Spis załączników .....	2
Informacje ogólne.....	3
1. Wstęp.....	4
2. Lokalizacja rejonu prac.....	4
3. Budowa geologiczna i hydrogeologia .....	5
3.1. Rzeźba terenu .....	5
3.3. Budowa geologiczna.....	5
3.3. Warunki gruntowo-wodne w rejonie badań .....	6
4. Badania geofizyczne .....	7
4.1. Wprowadzenie.....	7
4.2. Badania sejsmiczne.....	8
4.2.1. Opis metody sejsmicznej .....	8
4.2.2. Wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW .....	9
4.2.3. Sejsmiczne badania refrakcyjne.....	11
4.2.4. Tomografia refrakcyjna .....	12
4.2.5. Zakres i metodyka wykonanych badań sejsmicznych .....	12
4.2.6. Pomiary geodezyjne .....	13
4.2.7. Wyniki badań sejsmicznych .....	14
4.2.8. Interpretacja wyników z badań sejsmicznych .....	14
5. Analiza stateczności .....	18
5.1. Wprowadzenie.....	18
5.2. Metoda numeryczna MRS .....	19
5.2.1. Opis metody numerycznej.....	19
5.2.2. Model obliczeniowy Mohra-Coulomba.....	21
5.2.3. Model obliczeniowy Hoeka-Browna .....	21
5.2.4. Zakres i metodyka wykonanych obliczeń .....	22
5.2.5. Wyniki obliczeń stateczności.....	25
5.3. Interpretacja wyników .....	25
6. Podsumowanie.....	27
7. Literatura oraz materiały archiwalne .....	28
8. Terenowa dokumentacja fotograficzna .....	30

## Spis załączników

zał. nr 1	Mapa lokalizacyjna w skali 1:10 000
zał. nr 2	Mapa dokumentacyjna w skali 1:2 000
zał. nr 3.1-3.6	Głębokościowe przekroje geotechniczne na obrazach sejsmicznych tomografii refrakcyjnej 2D w skali 1: 500/200
zał. nr 4.1-4.6	Głębokościowe przekroje geotechniczne na obrazach sejsmicznych MASW 2D w skali 1: 500/200
zał. nr 5.1-5.5	Modele numeryczne dla przekrojów geotechnicznych w skali 1: 500
zał. nr 6.1.1-6.1.5	Rozkłady wskaźników deformacji ze ścinania dla modeli pierwotnych w skali 1: 500
zał. nr 6.2.1-6.2.5	Rozkłady wskaźników deformacji ze ścinania dla modeli wtórnych w skali 1: 500
zał. nr 6.3.1-6.3.5	Rozkłady wskaźników deformacji ze ścinania dla modeli wtórnych z obciążeniem statycznym w skali 1: 500

## Informacje ogólne

<b>Tytuł opracowania:</b>	Analiza stateczności terenu osuwiskowego w strefie ekonomicznej w miejscowości Andrychów na podstawie geofizycznych badań sejsmicznych i archiwalnych badań geotechnicznych
<b>Lokalizacja terenu badań:</b>	Rejon osuwiska na terenie działek inwestycyjnych na zbiegu ulic: Przemysłowej, Strefowej i Białej Drogi, w miejscowości Andrychów, gmina Andrychów, powiat wadowicki, województwo małopolskie
<b>Cel prac:</b>	Analiza stateczności osuwiska w 5 przekrojach geotechnicznych na podstawie modelowań numerycznych z wykorzystaniem nieinwazyjnych i ciągłych badań geofizycznych metodą sejsmiczną oraz archiwalnych badań geotechnicznych
<b>Zakres robót:</b>	Geofizyczne badania sejsmiczne techniką tomografii refrakcyjnej 2D oraz MASW 2D wzdłuż 6 profili pomiarowych, o sumarycznej długości 1875 mb
<b>Zlecniodawca:</b>	Gmina Andrychów ul. Rynek 15 34-120 Andrychów
<b>Wykonawca:</b>	GeoSpectrum sp. z o. o. os. Centrum A 9/33 31-924 Kraków

## 1. Wstęp

Na zlecenie Gminy Andrychów, ul. Rynek 15, 34-120 Andrychów, firma GeoSpectrum sp. z o. o. wykonała nieinwazyjne badania geofizyczne metodą sejsmiczną techniką tomografii refrakcyjnej 2D oraz MASW 2D.

Badania przeprowadzono w dniach 21, 22 oraz 29 maja 2020 r. na terenie działek inwestycyjnych strefy ekonomicznej, gdzie po pracach deniwelacyjnych powierzchni terenu i dostosowaniu jej do spadków wynoszących do 5 %, w usypanych skarpach, po opadach atmosferycznych pojawiły się ruchy osuwiskowe.

Celem przeprowadzonych badań było uszczegółowienie rozpoznania struktury podłoża gruntowo-skalnego oraz nasypów, pod kątem stateczności przedmiotowego osuwiska.

Wyniki badań zostaną wykorzystane do optymalizacji zakresu projektowanych prac geotechnicznych, budowlanych oraz finalnej koncepcji ewentualnego zabezpieczenia przed dalszymi, niekorzystnymi procesami osuwiskowymi w podłożu.

Lokalizacja obszaru badań oraz zakres geofizycznych prac terenowych zostały ustalone ze Zleceniodawcą.

## 2. Lokalizacja rejonu prac

Badania geofizyczne przeprowadzono dla inwestycji znajdującej się w województwie małopolskim, w powiecie wadowickim, w północno-zachodniej części miasta Andrychów, na zbiegu ulic: Przemysłowej, Strefowej oraz Białej Drogi. Badaniu podlegał obszar strefy aktywności gospodarczej w Andrychowie, wyznaczony i wskazany przez Zleceniodawcę w przekazanych materiałach. W chwili obecnej, na przedmiotowym obszarze, znajdują się trzy mury oporowe, drogi – ul. Strefowa, droga łącząca ul. Strefową z ul. Przemysłową określana jako łącznik oraz droga wewnętrzna zakończona placem nawrotowym, chodniki, ścieżka rowerowa, oświetlenie przy ul. Strefowej i wzdłuż łącznika oraz infrastruktura podziemna. W sąsiedztwie znajduje się zabudowa przemysłowo-usługowa i nieużytki.

Położenie geofizycznych profili skorelowano z lokalizacją archiwalnych badań geotechnicznych, uwzględniając warunki metodyczne i terenowe. Lokalizacja rejonu prac została przedstawiona na mapie lokalizacyjnej w skali 1:10 000 (zał. nr 1) oraz na mapie dokumentacyjnej w skali 1:2 000 (zał. nr 2).

### 3. Budowa geologiczna i hydrogeologia

#### 3.1. Rzeźba terenu

Zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym wg. Kondrackiego, omawiany teren należy zaliczyć do mezoregionu Pogórza Śląskiego, które znajduje się w obrębie makroregionu Pogórza Zachodniobeskidzkie. Jego cechą charakterystyczną jest odwodnienie konsekwentne, a w związku z tym rozcięte działy wodne o przebiegu południkowym.

Przedmiotowy teren znajduje się na stoku rozciągającym się między spłaszczeniem płaszczowinowym, z kulminacjami powyżej 340 m p.p.t. od strony zachodniej, a zboczem ograniczającym rozległe dno potoku Wieprzówka od strony wschodniej.

Przed rozpoczęciem robót ziemnych, na przedmiotowym terenie, stok był nachylony około 5° (9%) w kierunku wschodnim, na jego powierzchni występowały trzy doliny nieckowate związane najprawdopodobniej z występującymi w przeszłości ciekami. Na powierzchni stoku, zgodnie z danymi z opracowań archiwalnych, brak było form terenu związanych z grawitacyjnym ruchem mas ziemnych. Omawiany teren był wykorzystywany dla celów rolniczych i przed 1989 r. został zmeliorowany przez zastosowanie sączków ceramicznych rozmieszczonych zgodnie ze spadkiem terenu. Rzędne wynosiły od 314,0 do 344,0m n.p.m.

Obecnie obszar ten jest przekształcony w wyniku prac związanych z makroniwelacją terenu. Teren przekształcono, tworząc skarpy zabezpieczone murami oporowymi i gruntem zbrojonym siatkami. Wysokość murów oporowych wynosi od 3,8 m do 6,8 m. Na naturalnym zboczu powstały trzy, prawie płaskie tarasy ustawione schodkowo jeden nad drugim. Po tym, jak zaobserwowane zostały uszkodzenia muru nr 1, wykonano wzdłuż jego podstawy nasypy z gruntu rodzimego w celu zabezpieczenia przed dalszym odchylaniem. Nasypy wykonano wyspowo, w ilości trzech-czterech sztuk, do wysokości około 2-4 m.

W odległości około 200-300 m na północny-wschód przepływają bezimienne cieki oraz potok Bobrek. W odległości około 0,6-1,2 km na północny-zachód, zachód oraz południowy-zachód przepływają Potok Olszyński, Roczynka oraz rzeka Bulówka. Zlewnię omawianego terenu stanowi rzeka Wieprzówka, przepływająca w odległości około 1,3 km na wschód od omawianego terenu [1].

#### 3.3. Budowa geologiczna

Pod względem geologicznym omawiany obszar leży na skraju fliszowych Karpat Zachodnich, a jego budowa geologiczna jest typowa dla młodych gór typu płaszczowinowego. Utwory Karpat nasunięte są tektonicznie na utwory miocenu zapadliska [10]. Zgodnie z informacjami zawartymi w objaśnieniach do Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi [11,12] rejon badań budują utwory należące do serii: skolskiej, podśląskiej i śląskiej oraz skałek andrychowskich. Utwory serii podśląskiej

zbudowane są głównie z margli i łupków pstrych m.in. łupków cieszyńskich, piaskowców grodziskich, łupków wierzowskich, piaskowców Igockich oraz warstw gezowych. Utwory te reprezentują interwał wiekowy od wczesnej kredy górnej do oligocenu. W utworach serii śląskiej można wyróżnić dwa elementy tektoniczne: jednostkę cieszyńską i godulską. Płaszczowina ta zbudowana jest głównie z łupków i piaskowców. Utwory serii skolskiej budują głównie: piaskowce ciężkowickie, łupki pstre, rogowce, margle i łupki, łupki menilitowe z wkładkami piaskowców gruboławicowych. Utwory te reprezentują interwał wiekowy eocen-oligocen-miocen. Na brzegu jednostki śląskiej występują tzw. Skałki Andrychowskie. Są to typowe porwaki tektoniczne, oderwane od podłoża przez płaszczowinę śląską. Skałki zbudowane są ze skał krystalicznych oraz wapieni jurajskich, senońskich i paleogeńskich [10].

Osady zapadliska przedkarpackiego w postaci kompleksu molasy mioceńskiej mają dużą miąższość i datowane są na dolny miocen i baden [11]. Zgodnie z danymi, na opisywanym obszarze znajdują się dwa wydzielenia utworów należących do zapadliska [13]. Iłołupki, piaskowce, piaski i żwiry wieku sarmat-panon oraz iły z wkładkami zlepieńców z olistolitami skał fliszowych wieku baden. Na podstawie badań osady te zaliczono do odrębnej jednostki tektonicznej Roczyn-Andrychowa [13].

Starsze osady przykryte są utworami czwartorzędowymi, wykształconymi jako osady związane z akumulacją rzeczno-lodowcową, w postaci osadów lessowych i lessopodobnych oraz, lokalnie, zastoiskowych, a w dolinach osadami związanymi z holoceniową działalnością rzek w postaci namulów, glin i glin zwięzłych oraz piasków o różnej granulacji i żwirów. Często osady przemieszczane są w dół stoków tworząc koluwia osuwiskowe.

W stropie przewierconej przestrzeni gruntowej, rozpoznano grunty czwartorzędowe, związane z akumulacją wodno-lodowcową i rzeczną, wykształcone w postaci pyłów, glin pylastych, pylastych zwięzłych, żwirów i żwirów gliniastych. Lokalnie, w obrębie gruntów spoistych, stwierdzono występowanie domieszek części organicznych. Grunty te przechodzą w osady wieku mioceńskiego, iły przechodzą wraz z głębokością w iłołupki. Grunty rodzime przykryte są nasypami niebudowlanymi, a w rejonie istniejącej infrastruktury, budowlanymi [1].

### 3.3. Warunki gruntowo-wodne w rejonie badań

Omawiany teren znajduje się w obszarze zlewni przepływającej w odległości około 1,3 km na wschód rzeki Wieprzówka.

Użytkowe wody podziemne występują w kilku piętrach. Czwartorzędowy poziom wód gruntowych jest poziomem ciągłym, związanym z dolinami rzecznyymi i z kopalnymi systemami dolin. Zbiorniki te posiadają niewielkie powierzchnie, lecz zasobne są w wodę. Spowodowane jest to drenującą działalnością rzek oraz piaszczysto-żwirowym

wykształceniem zawodnionych osadów. Czwartorzędowe poziomy wodonośne mają charakter otwarty, o współczynniku filtracji  $1-3 \cdot 10^{-4}$  m/s [14]. Dla większości zbiorników brak warstwy izolującej pokrywy w stropie warstw wodonośnych, co umożliwia infiltrację wód opadowo-roztopowych. W związku z tym, ilość i głębokość występowania tego typu wód zależna jest od warunków atmosferycznych, wielkości, długotrwałości i intensywności opadów.

Zbiorniki wodne związane ze starszymi utworami mają charakter zbiorników wód szczelinowo-porowych i występują poniżej poziomu rozpoznania.

W trakcie robót geologicznych stwierdzono występowanie wód gruntowych związanych z czwartorzędowym poziomem wodonośnym. Wodę poziomu czwartorzędowego nawiercono w otworach geologiczno-inżynierskich R7 w strefie głębokości 3,1 m p.p.t. Zwierciadło ma charakter ciągły, przeważnie swobodny, jedynie wyjątkowo napięty i pozostaje w związku hydraulicznym z okolicznymi ciekami. Strefę saturacji czyli nasyconą wodą podziemną, stwierdzono w północno-wschodnim rejonie przedmiotowego terenu, w rejonie przepływającego potoku Bobrek, w znacznej odległości od murów oporowych.

W obrębie gruntów spoistych została stwierdzona grawitacyjna woda podziemna (wsiąkowa). Sączenia zostały rozpoznane w otworach geologiczno-inżynierskich R1, R3, D2, D4, D11, D12, D13 w strefie głębokości 2,3-7,7 m p.p.t. oraz archiwalnych - geotechnicznych A4, A5, A6, A12, w strefie głębokości 1,0–11,1 m p.p.t. W otworach R1, R3, D11, D12 i A5 wypływy były intensywne, ze stabilizacją w strefie głębokości 2,0-7,3 m p.p.t. W archiwalnych odkrywkach fundamentowych u podnóża muru oporowego nr 1, również wystąpiły wypływy wody [1].

## 4. Badania geofizyczne

### 4.1. Wprowadzenie

Geofizyka, dzięki wykorzystaniu praw fizyki, daje odpowiedź o charakterze, strukturze i parametrach badanego ośrodka. Badania geofizyczne pozwalają uzyskać ciągłe odwzorowanie zmian strukturalnych oraz parametrów geomechanicznych w badanym ośrodku, bez konieczności wykonywania robót geologicznych np. wierceń, odkrywek. Do badania zmian ciągłości ośrodka gruntowego czy np. rozpoznania podłoża gruntowego pod kątem występowania w nim stref spękań, rozluźnień, pustek, wyznaczania podłoża skalnego, a także obiektów takich jak fundamenty, podziemne zbiorniki itp., powszechnie stosowane są nieinwazyjne metody geofizyczne. Badania geofizyczne dla rozpoznania podłoża gruntowo-skalnego są wskazywane lub wręcz zalecane w różnego rodzaju wytycznych, instrukcjach i rozporządzeniach.



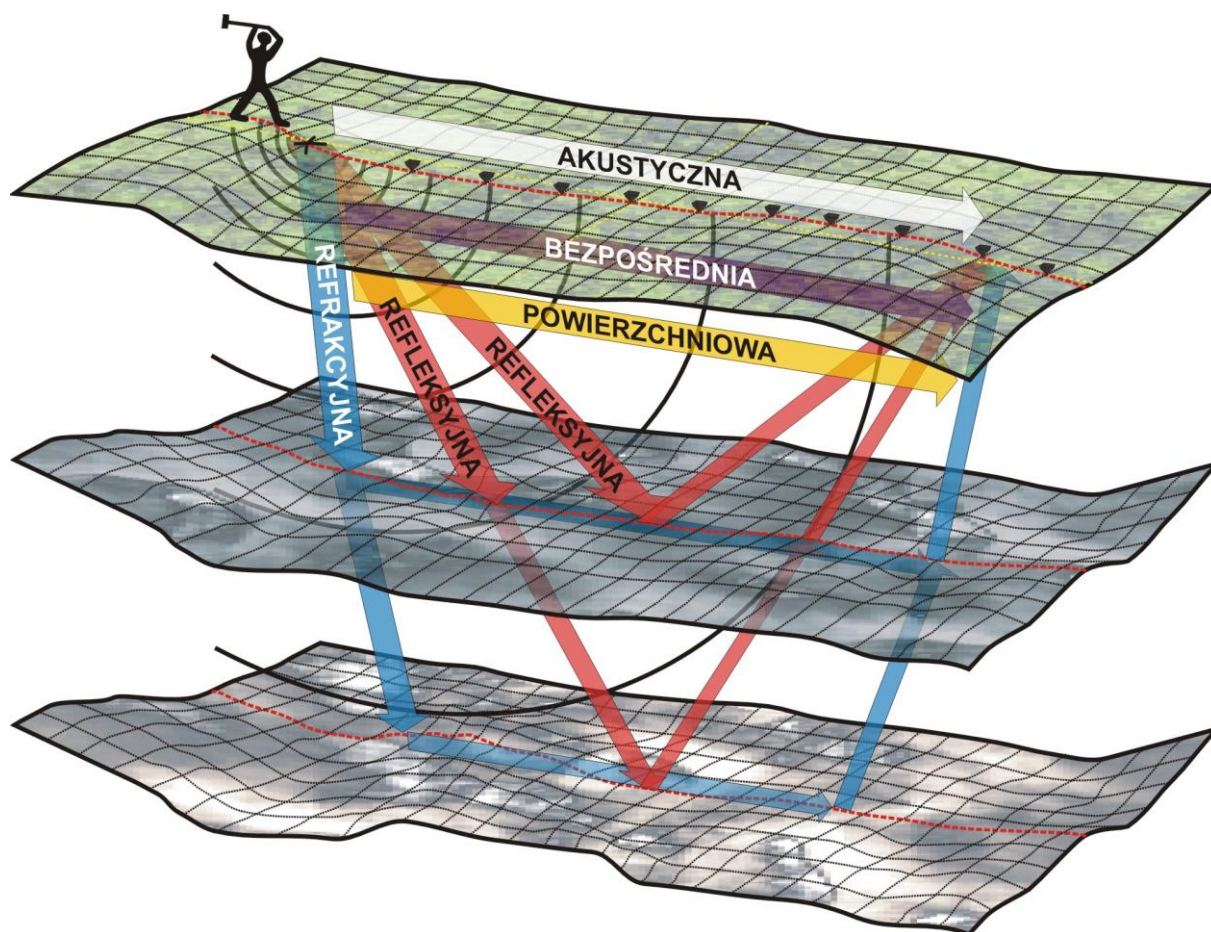
W zadaniach inżynierskich najczęściej stosuje się badania sejsmiczne techniką MASW/MAM/ReMi, elektrooporowe, georadarowe oraz grawimetryczne. Podstawowym kryterium doboru metody geofizycznej jest techniczna możliwość wykrycia przy jej pomocy niejednorodności. Dobór metody uzależniony jest od różnych czynników takich jak: cel badań, wymagana głębokość i dokładność (rozdzielczość) rozpoznania, warunki geologiczne (występowanie utworów spoistych, zawodnienia), warunki terenowe (duże deniwelacje, zadrzewienie, zakłócenia w postaci drgań np. komunikacyjnych, intensywne opady), obecność infrastruktury energetycznej, infrastruktura metalowa, itp.

Dla potrzeb wykonania zadania, w uzgodnieniu ze Zleceniodawcą, zaprojektowano i wykonano ciągłe nieinwazyjne geofizyczne badania sejsmiczne techniką MASW 2D oraz dodatkowo techniką tomografii refrakcyjnej.

## 4.2. Badania sejsmiczne

### 4.2.1. Opis metody sejsmicznej

Badania geofizyczne metodą sejsmiczną oparte są na pomiarze i analizie sztucznie wygenerowanych fal sprężystych (sejsmicznych) w ośrodku skalnym. Podczas pomiarów w ośrodku skalnym powstaje wiele rodzajów fal.



Rys. 4.1. Typy fal powstających podczas pomiarów metodą sejsmiki inżynierskiej

Z punktu widzenia fizycznego fale można podzielić na: podłużne P, poprzeczne S należące do grupy fal objętościowych, a także fale powierzchniowe: Rayleigha R i Love'a Q. Ze względu na sposób rozchodzenia się fal rozróżnia się fale na: bezpośrednie, refrakcyjne, odbite (refleksyjne), refragowane (rys. 4.1). Fale te przechodząc przez niejednorodny ośrodek jak pustki, strefy mniej zagęszczone, uskoki, horyzonty wód gruntowych itp. ulegają różnym zjawiskom fizycznym np.: załamania, odbicia, dyfrakcji.

Niektóre z nich mogą być wykorzystane do oceny właściwości badanego ośrodka. Powstałe w badanym ośrodku fale są rejestrowane przez odbiorniki (geofony) w postaci sygnałów elektrycznych. Sygnały te poprzez kabel sejsmiczny są przesyłane do rejestratora sejsmicznego i następnie, już w postaci cyfrowej, zapisywane w formie rekordów sejsmicznych. Zarejestrowane dane poddawane są zaawansowanemu przetwarzaniu i interpretacji z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. Wynikiem pomiarów są przekroje zmian wielkości sejsmicznej fali z głębokością dla każdego profilu pomiarowego. Wynikiem pomiarów są profile zmian wartości np. sejsmicznej fali poprzecznej ( $V_s$ ) z głębokością. Za pomocą takich badań można określać budowę i właściwości ośrodka. Każda zmiana w budowie ośrodka oraz jego właściwościach (np. spękania, zwietrzenie, uskok, zmiana gęstości i parametrów sprężystych) wpływa na zmianę parametrów fal sejsmicznych jak wartości prędkości fal sejsmicznych czy też tłumienie.

#### 4.2.2. Wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW

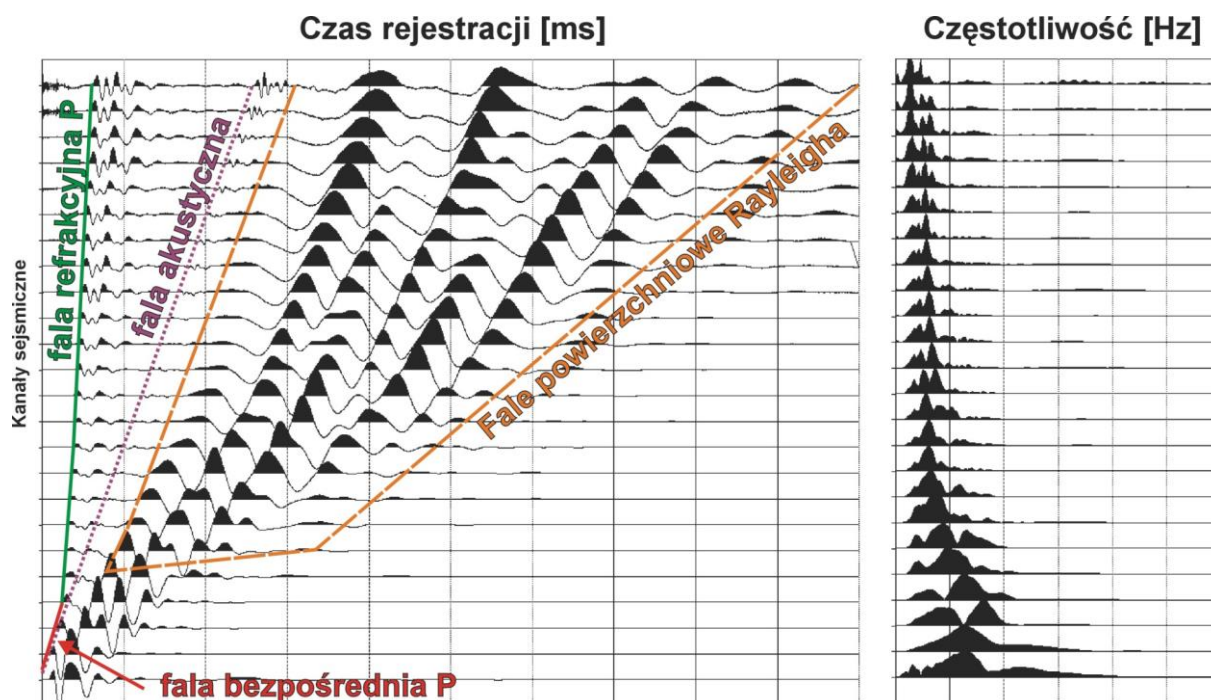
Pomiary sejsmiczne techniką MASW w wersji z aktywnym źródłem fali, należą do grupy metod falowych. Są bezinwazyjnymi metodami badania ośrodka geologicznego, dostarczającą informacji na temat stanu geomechanicznego. Metoda MASW bazuje na wyodrębnieniu z danych pomiarowych, pakietu powierzchniowych „dyspersyjnych” fal typu Rayleigha (rys.4.2) a następnie ich specjalistycznemu przetwarzaniu i interpretacji [15,16].

Główną zaletą tej metody jest uwzględnienie skomplikowanej natury fal sejsmicznych, zawierającej zakłócenia takie jak wyższe mody fal powierzchniowych, fale rozproszone itp.

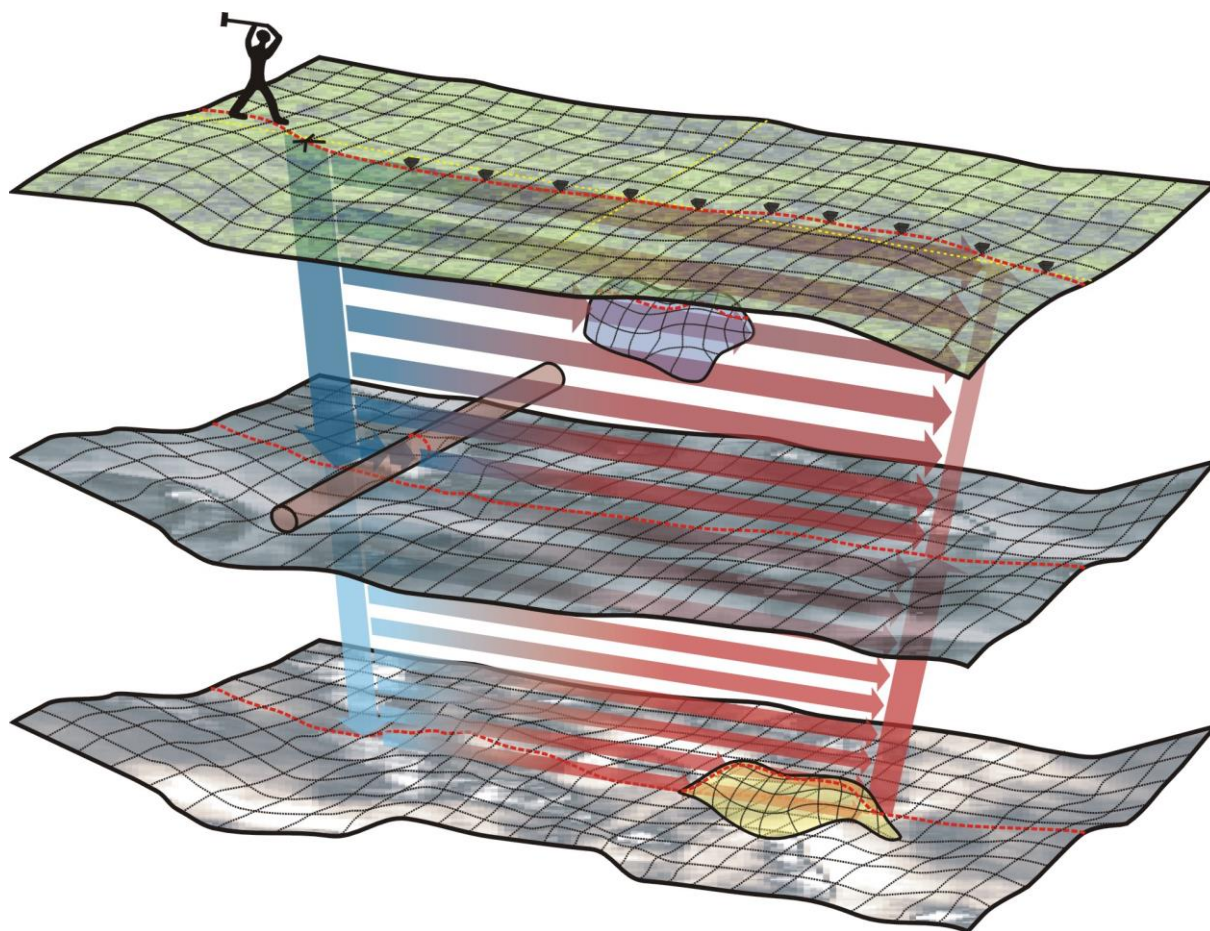
Dla celów analizy technikami MASW podstawą jest znajomość zmian prędkości sejsmicznej fali poprzecznej S z głębokością.

W zagadnieniach inżynierskich stosowana jest technika wielokanałowej analizy fal powierzchniowych w wersjach:

- MASW 1D (profile głębokościowe),
- MASW 2D (przekroje głębokościowe),
- MASW 3D (mapy głębokościowe) – dla badań przestrzennych.



Rys. 4.2. Przykład rekordu sejsmicznego wraz z wyznaczonymi rodzajami zarejestrowanych fal

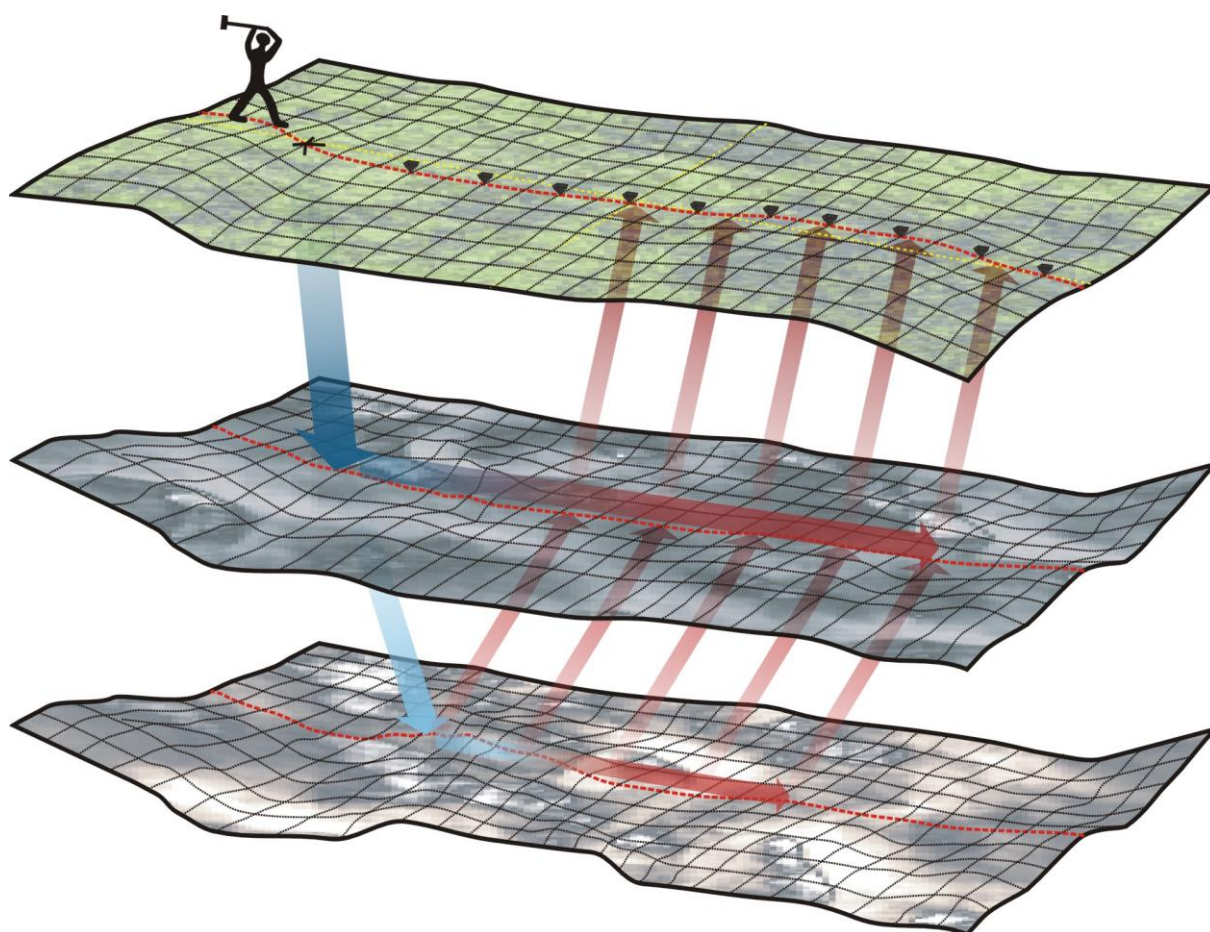


Rys. 4.3. Schemat pomiarów sejsmicznych techniką MASW



#### 4.2.3. Sejsmiczne badania refrakcyjne

Pomiary sejsmiczne techniką refrakcyjną są powszechnie stosowane w szczegółowych badaniach warstw przypowierzchniowych. W technice refrakcyjnej najważniejszym elementem jest pomiar czasu tzw. pierwszych wstąpień ("first break") przyjsia fali refrakcyjnej typu P. Jest to czas gdy odbiornik np. geofon zaczyna się poruszać w momencie przyjsia fal sztucznie wygenerowanych w źródle sejsmicznym. Fala refrakcyjna powstaje na granicy dwóch ośrodków (warstw) różniących się znacząco prędkościami fal przy czym prędkość w warstwie niżejległej musi być większa (rys. 4.4). Znając czasy przyjsia fal oraz geometrię pomiarową (położenie odbiorników oraz punktów wzbudzania energii sejsmicznej) można, na podstawie praw fizyki (zjawisko refrakcji i prawo załamania fali w optyce), dokładnie określić głębokość i przebieg granic refrakcyjnych związanych z granicami i nieciągłościami geologicznymi lub np. poziomem wód gruntowych. Efektem badań refrakcyjnych jest przekrój z granicami sejsmicznymi rozróżniającymi warstwy ośrodka o znacznie różniących się parametrach geomechanicznych np. luźny nadkład, koluwia oraz nienaruszone, „twarde” podłoże skalne. Wraz z informacjami geologicznymi np. z otworów przekrój sejsmiczny refrakcyjny jest podstawą do interpretacji geologiczno - inżynierskiej.



Rys. 4.4. Schemat pomiarów sejsmicznych techniką refrakcyjną

#### 4.2.4. Tomografia refrakcyjna

Technika tomografii refrakcyjnej bazuje na klasycznych sejsmicznych badaniach refrakcyjnych. W technice tej wykorzystywane są fale bezpośrednie oraz tzw. refrakcyjne „ślizgające się” po granicach rozdzielających różne warstwy np. geologiczne.

Technika refrakcyjna polega na opracowaniu optymalnego modelu prędkościowo-głębokościowego na podstawie zależności pomiędzy czasami wstąpień i różnymi prędkościami fal P w ośrodku. Tomografia refrakcyjna, w przeciwieństwie do klasycznej refrakcji dającej dobre wyniki w ośrodkach o relatywnie małym zmiennym budowie i warstwach różniących się znacząco od siebie prędkościami fal, dodatkowo pozwala lokalizować struktury bardziej złożone, gdzie występują zmiany wartości prędkości fali sejsmicznej w pionie i poziomie np. strefy uskokowe, obszary występowania krasu, osiadań, pustek a także rozróżniać zmiany właściwości geomechanicznych w ośrodku o małym zmiennym parametrach sprężystych (np. rozróżnienie litego i spękanego podłoża). Efektem badań tomograficznych jest określenie pola prędkości podłużnej fali typu P w badanym ośrodku.

#### 4.2.5. Zakres i metodyka wykonanych badań sejsmicznych

Badania geofizyczne zostały poprzedzone wytyczeniem na terenie badań położenia 6 profili pomiarowych wzdłuż geodezyjnie wytyczonych profili. Ich lokalizacje i wstępne długości profili pomiarowych zostały ustalone ze Zleceniodawcą. Ostateczne położenie i długości zostały ustalone przy uwzględnieniu warunków terenowych oraz założeń metodycznych i przedstawiono na mapie dokumentacyjnej (zał. nr 2). Profile wykonano za pomocą jednostkowych rozstawów o długości 115,0 m, na tzw. „zakładkę”, przy uwzględnieniu oczekiwanych zasięgów głębokościowych. W sumie wykonano 23 rozstawów w 6 profilach sejsmicznych. W tabeli 4.1 zestawiono ich pomiarowe oraz wynikowe długości, nieznacznie krótsze w przypadku techniki MASW, co wynika z samej metodyki przetwarzania danych w tej technice.

Tabela 4.1. Zakres wykonanych badań sejsmicznych

Nazwa profilu wynikowego	Długość pomiarowego profilu sejsmicznego [m]	Długość wynikowego profilu sejsmicznego MASW [m]	Długość wynikowego profilu sejsmicznego tomografii refrakcyjnej [m]
I-I'	255,0	240,0	255,0
II-II'	255,0	245,0	255,0
III-III'	255,0	245,0	255,0
IV-IV'	255,0	245,0	255,0
V-V'	390,0	380,0	390,0
VI-VI'	465,0	455,0	465,0
<b>Suma:</b>	<b>1875,0</b>	<b>1810,0</b>	<b>1875,0</b>

Pomiary sejsmiczne przeprowadzone zostały za pomocą 24-kanałowej aparatury sejsmicznej. Kolejnym etapem były prace kameralne obejmujące przetwarzanie, interpretację danych geofizycznych oraz wykonanie końcowego opracowania.

Podstawowe parametry pomiarów sejsmicznych przedstawiały się następująco:

- wzbudzanie fali sejsmicznej za pomocą mechanicznego uderu młotem,
- długość profilu pomiarowego: 255,0-465,0 m,
- geofony pionowe o częstotliwości własnej 4,5 Hz,
- odstęp między czujnikami: 5,0 m,
- odstęp między punktami wzbudzania fali (PS): 5,0 – 10,0 m,
- krok próbkowania: 0,125 ms,
- czas zapisu: 1,5 sek.,
- składanie pionowe: 5-krotne.

#### 4.2.6. Pomiary geodezyjne

Prace geodezyjne objęły wytyczenie w terenie początków i końców 6 profili geofizycznych. Wyznaczono również współrzędne XYZ dla punktów pośrednich, leżących na profilach geofizycznych w interwale co 5 metrów, gdzie profile I-I', II-II', III-III' oraz IV-IV' miały długość 255 metrów, profil V-V' miał długość 390 metrów, a VI-VI', przebiegający prostopadłe do nich miał długość 465 metrów. Zamierzono w terenie dodatkowe współrzędne dla punktów charakterystycznych niezbędnych do określenia ukształtowania powierzchni badanego obszaru. Pomiar wykonano urządzeniem GPS firmy TOPCON model:FC-5000 S/N:218534, w oparciu o pomiar metodą „RTK”.

W ramach obróbki danych geodezyjnych sporządzono podkład mapowy w układzie 2000, w formacie cyfrowym DXF zawierającym wyeksportowane współrzędne XYZ dla profili geofizycznych, oraz dodatkowych punktów geodezyjnych w ich obrębie. W sumie wykonano pomiary dla 164 punktów. W tabeli nr 4.2 przedstawiono zestawienie współrzędnych dla początków i końców profili.

Tabela 4.2. Zestawienie współrzędnych dla wybranych punktów

Nazwa	Opis	Współrzędne		Rzędna
		X [m]	Y [m]	
-	-			Z [m n.p.m.]
I	początek profilu geofizycznego I-I'	5526512,6	7379787,6	329,21
I'	koniec profilu geofizycznego I-I'	5526562,0	7379542,6	344,68
II	początek profilu geofizycznego II-II'	5526588,3	7379809,3	325,52
II'	koniec profilu geofizycznego II-II'	5526639,6	7379564,6	343,99
III	początek profilu geofizycznego III-III'	5526629,3	7379821,2	324,63
III'	koniec profilu geofizycznego III-III'	5526678,5	7379576,0	343,61
IV	początek profilu geofizycznego IV-IV'	5526715,0	7379863,7	321,93
IV'	koniec profilu geofizycznego IV-IV'	5526763,2	7379613,2	343,15
V	początek profilu geofizycznego V-V'	5526745,6	7379994,3	316,72

Nazwa	Opis	Współrzędne		Rzędna
		X [m]	Y [m]	Z [m n.p.m.]
-	-			
V'	koniec profilu geofizycznego V-V'	5526828,4	7379613,2	344,25
VI	początek profilu geofizycznego VI-VI'	5526434,7	7379644,5	341,45
VI'	koniec profilu geofizycznego VI-VI'	5526883,0	7379767,9	334,06

#### 4.2.7. Wyniki badań sejsmicznych

Położenie wynikowych profili sejsmicznych przedstawiono na mapie dokumentacyjnej w skali 1:2 000 (zał. 2).

Wyniki badań przedstawiono w formie przekrojów geotechnicznych na sejsmicznych obrazach tomografii refrakcyjnej 2D (zał. 3.1-3.6) oraz MASW 2D (zał. 4.1-4.6) w skali 1:500/200. Przekroje przedstawiają rozkłady wartości prędkości sejsmicznych fal typu P i S, do maksymalnej głębokości 34,0 m p.p.t. wraz z interpretacją.

#### 4.2.8. Interpretacja wyników z badań sejsmicznych

Interpretację wyników poprzedziło naniesienie na przekroje sejsmiczne wyników z archiwalnych badań geotechnicznych w postaci profili otworów. Spośród archiwalnych otworów wybrano te najbliższe profilu sejsmicznych, a następnie zrzutowano je na przekroje. Do tego celu użyto wyników z 2 serii wierceń: R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, D2, D4, D11, D12, D13 wykonanych w marcu 2019 [1] oraz A4, A5, A6, A7, A9, A12 wykonanych we wrześniu 2019 [1].

Interpretacja wyników badań sejsmicznych polegała na analizie wartości, zakresu oraz charakteru zmienności pola prędkości fal sejsmicznych P i S na przekrojach (zał. 3.1-3.6 oraz zał. 4.1-4.6) oraz skorelowaniu prędkości fal sejsmicznych z wstępnie zidentyfikowanymi warstwami.

Profile sejsmiczne zostały tak zaprojektowane i wykonane, by 5 profili osuwiskowych I-I', II-II', III-III', IV-IV' oraz V-V' przebiegały możliwie równolegle do potencjalnych kierunków ruchów masowych badanego osuwiska, wynikających z pierwotnego ukształtowania powierzchni terenu. Brano jednak pod uwagę lokalizację wykonanych już otworów geologicznych [1]. Profil nr VI-VI' wykonany został wzdłuż istniejącej drogi, przecinając się prostopadłe z profilami osuwiskowymi. Taki układ profili pozwala na korelację przestrzenną interpretacji geotechniczno-geofizycznej odpowiadającym profilom przekrojów sejsmicznych. Dostępne dane geologiczne i geotechniczne zlokalizowane są na wszystkich profilach pomiarowych. Oznacza to, że interpretacja geotechniczno-geofizyczna została przeprowadzona na bazie korelacji otworów z wynikami sejsmicznymi. Zastosowana metodyka interpretacji została opisana w dalszej części tego rozdziału.

Analiza przekrojów tomografii refrakcyjnej wskazuje na zmiany wartości prędkości  $V_p$  z głębokością. Jeśli wartości prędkości rosną to powiązane jest to z utworami „bardziej

sprężystymi”, co za tym idzie posiadającymi wyższe parametry wytrzymałościowe. Z tej metody można zatem przyjąć charakter układu warstw geotechnicznych oraz określić przypuszczalną granicę podłoża skalnego.

Analiza obrazów sejsmicznych w metodzie MASW wskazuje natomiast na zaburzenia pola prędkości fali S, zwłaszcza w strefie przypowierzchniowej. Znajduje to swoje odzwierciedlenie w badaniach otworowych jako występowanie utworów o różnej genezie, różnych wilgotnościach, stanach i parametrach wytrzymałościowych.

Wartości prędkości fal sejsmicznych  $V_P$  zmieniają się w zakresie od 300 m/s do 3000 m/s i wzrastają wraz z głębokością. Wartości prędkości fal sejsmicznych  $V_S$  zmieniają się w zakresie od 50 m/s do 750 m/s i również generalnie wzrastają wraz z głębokością.

Na przekroju osuwiskowym tomografii refrakcyjnej 2D nr I-I' (zał. 3.1), widać wyraźnie strefę o obniżonych prędkościach przy warstwach przypowierzchniowych w odległości od początku przekroju do 195 m, sięgającą od 4 do 7 metrów głębokości, przy czym największe obniżenia prędkości obserwowane są w rejonie tarasu zbudowanego z nasypów zakończonych murem. Przekrój ten umożliwił uszczegółowienie granicy między utworami nieskonsolidowanymi a zalegającą w podłożu skałą – łożupkiem. W miejscu otworu R4 od powierzchni terenu do głębokości około 4,1 metrów występują grunty nasypowe zbudowane z glin pylastych w różnych stanach plastyczności. Poniżej zalegają rodzime utwory spoiste plastyczne w formie glin pylastych oraz glin pylastych przewarstwionych pyłem. Od ok. 6,8 m do końca otworu występują mioceńskie ły przewarstwione gliną pylastą zwięzłą z dodatkiem żwiru, ły przewarstwione łożupkiem oraz łożupek w stanach twardoplastycznych i półzwartych. Do 13,5 m od powierzchni według autorów [1] są to utwory koluwalne, które występują od początku profilu do odległości ok. 170 m, gdzie następuje ich wyklinowanie. W otworze R3 oraz D11 nie stwierdzono występowania tego typu utworów. Widoczna jest natomiast miększa warstwa żwirów gliniastych, które zalegają na warstwie łożupków. Od początku przekroju MASW 2D I-I' (zał. 4.1), obejmującego skarpę z murem oraz otwór R4 do odległości 70 m profilu, obserwuje się strefę obniżenia prędkości fali  $V_S$ , która jest prawdopodobnie spowodowana ruchami osuwiskowymi w przeszłości. Strefa ta sięga do rzędnej 313 m n.p.m. od początku przekroju i kontynuuje się gwałtownie wznosząc do ok. 321 m n.p.m. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w interpretacji geotechniczno-geofizycznej popartej wynikami wierceń w otworze R4. Poza tą strefą, w dalszej części przekroju, warstwie wartości prędkości fal sejsmicznych  $V_S$  wzrastają poziomo wraz z głębokością. Obraz sejsmiczny MASW 2D w dalszej części tego przekroju nie wykazuje dalszych zaburzeń pola prędkości  $V_S$ , a co za tym idzie nie stwierdza się lokalnych osłabień ośrodka gruntowo-skalnego.

Na przekroju II-II' również uwidacznia się przypowierzchniowa strefa obniżonych prędkości dla obu składowych prędkości  $V_P$  (zał. 3.2) i  $V_S$  (zał. 4.2). Co więcej, strefa ta jest



większa, rozciągając się na długości całego przekroju MASW, jak i tomografii refrakcyjnej. Na przekroju tomografii refrakcyjnej strefa ta przebiega od ok. 2 metrów głębokości na początku przekroju do około 7 metrów głębokości w dalszej jego części, przy czym największe obniżenia wartości prędkości obserwowane są od odległości 170 m. Przekrój ten umożliwił uszczegółowienie granicy między utworami nieskonsolidowanymi a podłożem skalnym – iłolupkiem. W miejscu otworu A9 i D12 od powierzchni terenu do głębokości około 3-4 metrów występują grunty nasypowe zbudowane z pospólek, glin, glin pylastych i żwirów, a w głębszych partiach glin zwięzłych w różnych stanach konsystencji i zagęszczenia. Poniżej zalegają rodzime utwory spoiste twardoplastyczne w formie iłu. W otworze D9 w odległości ok. 95 m od otworu D12 występują od powierzchni nasyp budowlany zbudowany z glin pylastych, poniżej występuje podłoże rodzime wykształcone w postaci glin zwięzłych, pyłów, glin pylastych, żwirów gliniastych, pospólek kończąc otwór na pospólkach gliniastych. Na obrazie sejsmicznym MASW II-II' (zał. 4.2) występują 2 strefy o obniżonej prędkości fali  $V_s$ . Pierwsza zaczyna się na rzędnej 311 m n.p.m. od początku profilu i rozciąga się do ok. 100 m, wznosząc na rzędną 330 m n.p.m. W porównaniu jednak do sąsiednich przekrojów, zaburzenia pola falowego fali S są znacznie słabsze. W dalszej części przekroju następuje wypłaszczenie warstw prędkości fali  $V_s$  poziomo do morfologii terenu. Od odległości ok. 190 m do ok. 222 m widoczna jest druga anomalia prędkości fali  $V_s$ , która widoczna jest również na przekrojach sejsmicznych III-III' oraz IV-IV'. Sięga do rzędnej ok. 323 m n.p.m. Anomalię tą wypełniają prawdopodobnie gliny pylaste zwięzłe z dodatkiem żwirów, nawiercone w otworze D8, zrzutowanym na przekroje III-III' oraz w otworze D4, zrzutowanym na przekroje sejsmiczne IV-IV'. Na uwagę jednak zwraca fakt, że przekrój II-II' reprezentuje rejon, który został poddany deniwelacji terenu w bardzo niewielkim stopniu. Nie usypano tu wysokich nasypów tarasowych, zakończonych murem. Jest to więc pewnego rodzaju poziom odniesienia w stosunku do pozostałych, znacznie przekształconych obszarów badanego zbocza.

Interpretacja przekroi III-III' ma podobny charakter jak II-II'. Uwidacznia się również przypowierzchniowa strefa niskich prędkości dla obu składowych prędkości  $V_P$  i  $V_s$ , rozciągająca się na długości obu przekrojów III-III'. Na przekroju tomografii refrakcyjnej (zał. 3.3) strefa ta sięga ok. 2 metrów głębokości na początku, zwiększając swoją miąższość do 4 m w okolicach muru, przy czym największe obniżenia prędkości obserwowane są do około 6 metrów głębokości od otworu D8. Dzięki wzajemnej korelacji geotechniczno-geofizycznej uszczegółowiono granicę między utworami nieskonsolidowanymi a skałą osadową – iłolupkiem. Na obrazie sejsmicznym MASW III-III' (zał. 4.3) zaobserwować można również 2 strefy o obniżonej prędkości fali  $V_s$ . Pierwsza, analogiczna jak w przypadku I-I' oraz II-II', zaczyna się na początku przekroju III-III' od powierzchni terenu sięgając do rzędnej 311 m n.p.m., aż do odległości ok. 90 m wznosząc się na poziom ok. 323 m n.p.m. W dalszej części

występuje wypłaszczenie warstw prędkości fali  $V_s$  poziomo do morfologii terenu. Na metrażu ok. 172 m do ok. 225 m widoczna jest druga anomalia prędkości fali  $V_s$ . Prawdopodobnie jest ona kontynuacją strefy opisanej na przekroju MASW II-II' (zał. 4.2). Sięga ona do rzędnej ok. 325 m n.p.m. a osłabienia parametrów sprężystych są spowodowane lokalną zmianą gruntów na gliny pylaste związane z dodatkiem żwiru, nawiercone w otworze D8, zrzutowanym na przekrój III-III'. Podejrzewa się tu występowanie luźniejszych gruntów, transportowanych i deponowanych w przeszłości poprzez wody opadowe.

Na przekroju tomografii refrakcyjnej 2D IV-IV' (zał. 3.4) uwidaczniają się lokalne zmiany prędkości dla składowej  $V_P$  na całym przekroju na głębokości poniżej 9 metrów p.p.t. Dzięki wynikom z wierceń dla otworów D13 i A6, przekrój sejsmiczny umożliwił uszczegółowienie granicy między utworami nieskonsolidowanymi a skałą osadową – iłolupkiem. Na obrazie sejsmicznym MASW IV-IV' (zał. 4.4) na uwagę zwraca kontynuacja strefy obniżonych prędkości wykrytych na przekrojach MASW II-II' i III-III'. Znajduje się ona od odległości ok. 180 m do ok. 215 m i sięga do rzędnej ok. 325 m n.p.m. Również tu założono wypełnienie materiałem gruntowym w formie glin zwięzłych z domieszkami żwirów, dodatkowo nawiercając w otworze D4, zrzutowanym na przekroje III-III', warstwy gruntów organicznych (warstwa IIb). Poza tą strefą obraz sejsmiczny nie wykazuje żadnych innych, lokalnych zaburzeń pola prędkości  $V_s$ .

Na przekroju tomografii refrakcyjnej 2D V-V' (zał. 3.5) uwidacznia się strefa jednostajnie obniżonych prędkości dla składowej  $V_P$  przy powierzchni terenu, na metrażu od około 230 m, gdzie niższe prędkości sięgają głębiej niż na początku przekroju. Nie stwierdza się jednak lokalnych zaburzeń a wartości prędkości mniej więcej układając się równolegle do powierzchni terenu, wzrastając poziomo wraz z głębokością. Na obrazie sejsmicznym MASW V-V' (zał. 4.5) poza niewielkimi, lokalnymi, przypowierzchniowymi obniżeniami prędkości fali  $V_s$ , nie zaobserwowano znaczących anomalii sejsmicznych a co za tym idzie osłabień w gruntach. Zauważalne jednak są niewielkie głębsze strefy zaburzeń w skale.

Ostatni przekrój tomografii refrakcyjnej 2D VI-VI' przebiega prostopadle do pozostałych profili sejsmicznych i pełni rolę przekroju do korelacji przestrzennej. Pomierzone wzdłuż niego prędkości fal sejsmicznych mogą nieznacznie się różnić od pozostałych pomiarów, gdyż kierunek propagacji fali ma na to wpływ. Wartości prędkości fal sejsmicznych  $V_P$  wzrastają wraz z głębokością (zał. 3.6). Obraz sejsmiczny na tym obszarze nie wskazuje żadnych potencjalnych zaburzeń pola prędkości  $V_P$ . Na obrazie sejsmicznym MASW VI-VI' (zał. 4.6) strefa obniżonych prędkości dla składowej  $V_s$  rozciąga się w odległości od początku do końca profilu. Sięga ona od ok. 6 metrów głębokości na metrażu od odległości ok. 280 m, przy czym największe obniżenia prędkości obserwowane są do około 14 metrów głębokości od odległości 380 m na przekroju.

Dzięki 5 profilom osuwiskowym I-I', II-II', III-III', IV-IV' oraz V-V', równomiernie rozmieszczonych na badanym obszarze, oraz profilowi korelacyjnemu VI-VI', możliwe było poszukiwanie większych stref zmiany pól prędkości dla obu składowych oraz prześledzenie ich przestrzennych zasięgów. Podsumowując, dla całego obszaru badań wykryto dwie główne strefy anomalii sejsmicznych, opisanych powyżej. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na zauważalne zaburzenia sygnału w warstwie skał – iłolupków. Widoczne są w tej warstwie lokalne zmiany prędkości w kierunku horyzontalnym. Można więc założyć, że skała występuje w formie bloków lub nierównomiernych skupisk co świadczy o burzliwej historii tego terenu. Prawdopodobnie miały tu miejsce w przeszłości głębsze ruchy masowe lub inne procesy geologiczne, jednak analizując kąty nachylenia głębszych warstw geotechnicznych nr IV, V oraz VI, które biegną stosunkowo poziomo, lub nachylone są czasem insekwentnie do zapadania stoku, można wysnuć założenie, że zbocze osiągnęło stateczność poprzez samopodparcie.

Tak geotechniczno-geofizycznie skorelowane przekroje sejsmiczne posłużyły do konstrukcji numerycznych modeli obliczeniowych, by szczegółowo przeanalizować płaszczyzny poślizgu oraz ich współczynniki bezpieczeństwa F.

## 5. Analiza stateczności

### 5.1. Wprowadzenie

Istnieje wiele sposobów, według których wykonuje się obliczenia stateczności dla osuwisk skarp i zboczy (utwory naturalne), ale także dla utworów antropogenicznych takich jak nasypy drogowe, kolejowe czy różnego rodzaju obwałowania. W dzisiejszych czasach, w dobie komputeryzacji, obliczenia te wykonuje się za pomocą specjalistycznych programów komputerowych, które w swych procedurach obliczeniowych wykorzystują różne algorytmy. Przeważająca większość z nich analizuje równowagę sił w zadanym modelu obliczeniowym. Wskaźnik stanu równowagi F lub inaczej FoS (ang. Factor of Safety – współczynnik bezpieczeństwa) jest stosunkiem uogólnionej sumy sił utrzymujących, wywołanych tarcie i spójnością materiału (a także sił pochodzących od zabezpieczenia geotechnicznego danej skarpy lub zbocza takich jak kotwie, gabiony, siatki geoweb) do sumy uogólnionych sił obciążenia, które wywołane są siłami grawitacji, obciążeniem statycznym i dynamicznym oraz siłami filtracji.

Przyjmuje się warunek graniczny dla tego współczynnika równy 1,00, gdzie wartości powyżej tej granicy uznaje się za stateczne. Parametr ten wyznacza się dla potencjalnej, najsłabszej płaszczyzny poślizgu w badanym zboczu lub skarpie. Oczywiście nie jest to klasyfikacja dwuwariantowa. Istnieje szereg bardziej złożonych klasyfikacji, które dobiera się do poszczególnych zagadnień.

Rozwiązanie równania stateczności najczęściej sprowadza się do znalezienia rzeczywistej lub potencjalnej powierzchni poślizgu, a dobór odpowiedniej metody obliczeniowej, która pozwala na ocenę stateczności skarpy lub zbocza, zależy od jej możliwej przewidywanej postaci deformacji. Przy analizie stateczności zbocza zbudowanego ze skał lub gruntów, należy wziąć pod uwagę wszystkie możliwe elementy procesu osuwiskowego.

Podczas doboru metody obliczeniowej zaleca się uwzględnienie:

- warstwowania gruntu,
- występowania i nachylenia nieciągłości,
- filtracji i rozkładu ciśnień wody w zboczu (uwzględnianie wody),
- stateczności krótko- i długotrwałej,
- odkształceń zbocza od pełzania.

Analizując szczegółowo konkretny przypadek programy obliczeniowe typują rodzinę powierzchni poślizgu przy czym obliczany jest współczynnik bezpieczeństwa dla najbardziej niekorzystnej z nich. Wykorzystując metody równowagi sił zakłada się dodatkowo:

- płaski stan naprężenie-odkształcenie – dwuwymiarowy charakter modelu obliczeniowego (przekrój geotechniczny),
- jednoczesne występowanie stanu granicznego na całej powierzchni poślizgu,
- liniowy rozkład naprężeń od ciężaru własnego,
- różne kształty powierzchni poślizgu: płaski, kołowo - cylindryczny, kołowy,
- występowanie przy granicznym stanie równowagi hipotezy wytrzymałościowej Mohra-Coulomba dla gruntów.

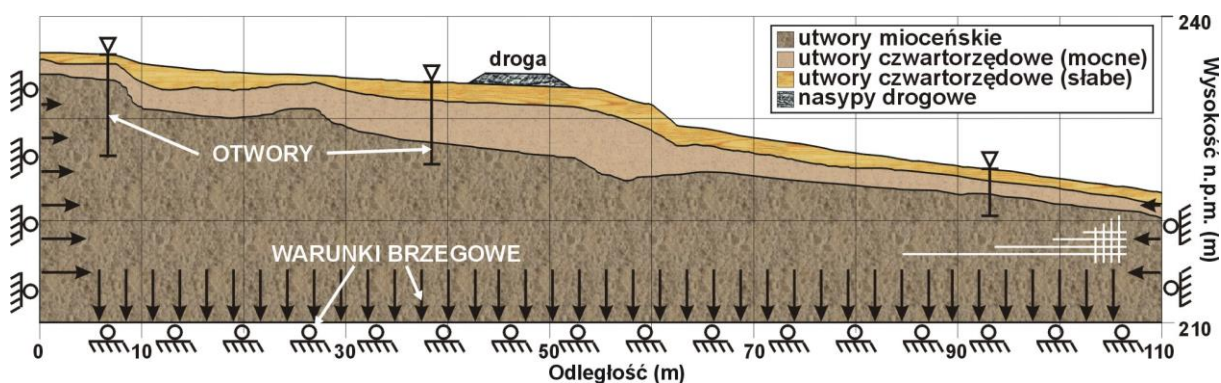
## **5.2. Metoda numeryczna MRS**

### **5.2.1. Opis metody numerycznej**

W celu głębszej analizy zachowania się skarp i zboczy wykonuje się modelowania numeryczne realizowane za pomocą różnych programów komputerowych. Jednym z programów komputerowych jest FLAC 2D (ang. Fast Lagrangian Analysis of Continua) amerykańskiej firmy Itasca. Program ten wykorzystuje metodę różnic skończonych, która należy do grupy metod obszarowych. W odróżnieniu od grupy metod brzegowych, gdzie przy opisanu modelu ośrodek traktowany jest jako ciągły i podział na elementy dotyczy jedynie brzegów ośrodka, metody obszarowe pozwalają na przypisanie właściwości również lokalnym utworom geologicznym. Jego wyższość polega na dużo większej swobodzie w opisywaniu konkretnego zadania geologicznego.

Metoda numeryczna pozwala na zobrazowanie wielu potencjalnych płaszczyzn poślizgu jednocześnie, natomiast współczynnik bezpieczeństwa FoS podawany jest dla najniższej wartości. Na podstawie przekroju geologiczno-inżynierskiego konstruuje się model

obliczeniowy (rys. 5.1) z uwzględnieniem wszelkich danych wejściowych. Model ten następnie jest pokryty siatką obliczeniową, tworząc oczka siatki, w których to będzie następowało przeliczenie parametrów geomechanicznych w każdym kolejnym kroku obliczeniowym.



Rys. 5.1. Przykładowy schemat modelu obliczeniowego wraz z warunkami brzegowymi i początkowymi dla metody numerycznej

W zależności od gęstości siatki, ośrodka geologicznego oraz stopnia jego rozpoznania (znajomość odpowiednich wielkości fizyczno-mechanicznych jako danych wejściowych), efektywność oraz czas obliczeń numerycznych rośnie wraz ze złożonością zadania. Jeżeli rozważane sytuacje geologiczno-inżynierskie są możliwe do modelowania, a sposób wyznaczenia danych wejściowych okazuje się dostatecznie szczegółowy do analizowania sytuacji, to wyniki obliczeń można spróbować wykorzystać w sposób ilościowy w procesie projektowania.

Podczas generowania siatki obliczeniowej, w zależności od rodzaju gruntów/skał w danej warstwie, określa się rodzaj modelu. Dla gruntów najczęściej stosowany jest model Mohra-Coulomba, natomiast dla skał dobiera się go w zależności od stopnia spękania i budowy blokowej. Dla skał fliszowych gdzie występują liczne przewarstwienia oraz cienkie wtrącenia, mogące poddawać się prawu plastycznego płynięcia, stosuje się między innymi model Hoeka-Browna.

W programie komputerowym FLAC możliwe jest dokonywanie symulacji ośrodka, w którym może zachodzić plastyczne płynięcie lub kruche pękanie, po osiągnięciu odpowiedniego warunku stanu granicznego dla plastycznego płynięcia lub granicy wytrzymałości. Program jest oparty na schemacie obliczeniowym Lagrange'a, który umożliwia modelowanie znacznych odkształceń i zniszczeń w ośrodku skalnym [17].

W obliczeniach numerycznych zastosowano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR). Metoda ta wskazuje przebieg powierzchni poślizgu w miejscu, w którym najwcześniej osiągnięty zostaje stan równowagi naprężenia stycznego i wytrzymałości na ścinanie.

### 5.2.2. Model obliczeniowy Mohra-Coulomba

Model Mohra-Coulomba należy do grupy modeli plastycznych. Ich złożoność polega na uwzględnieniu deformacji plastycznych oraz nieliniowej zależności naprężenie-odkształcenie. Zaangażowane są tu procesy wzmocnienia, osłabienia oraz płynięcia ośrodka opisane przez skomplikowane funkcje wytrzymałościowe określające kombinacje naprężeń. W programie FLAC zdefiniowano plastyczne płynięcie w oparciu o podstawy założeń ogólnej teorii plastyczności, dla której całkowity przyrost naprężeń rozkłada się na część plastyczną i sprężystą [17]. Dodatkowo obie te części są współosiowe z głównym wektorem naprężenia. Prawo płynięcia określa kierunek wektora odkształceń plastycznych jako normalny do powierzchni. Wszelkie prawa w programie FLAC są sformułowane w oparciu o naprężenie efektywne, a nie całkowite. Jeśli zostanie osiągnięte kryterium wytrzymałościowe następuje deformacja plastyczna. W takim przypadku tylko część sprężysta wzrostu odkształceń przyczynia się do wzrostu naprężenia. Część druga jest korygowana przy użyciu plastycznego prawa płynięcia, co zabezpiecza przed zniekształceniem naprężeń w funkcji wytrzymałościowej.

Parametry statyczne, brane pod uwagę podczas obliczeń stateczności, opisujące wytrzymałość modelu to spójność  $c$  wyrażona w [Pa] oraz kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi$  wyrażony w [°].

### 5.2.3. Model obliczeniowy Hoeka-Browna

Kryterium Hoeka-Browna opracowano dla oszacowania wytrzymałości skał w zależności między innymi od stopnia spękania. Jest ono nieliniowe w płaszczyźnie pionowej i liniowe w płaszczyźnie prostopadłej do osi hydrostatycznej. Model ten zakłada, że poprzez dostosowanie siły tarcia i pomiar stopnia spękania, można oszacować właściwości wytrzymałościowe skał. Jako kryterium wytrzymałości szczytowej dla nienaruszonej próbki skalnej, kryterium Hoeka-Browna ma tę zaletę, że opisuje nieliniowy wzrost wytrzymałości przy rosnącym ograniczeniu, co jest zgodne z obszernymi laboratoryjnymi danymi z testów trójosowych obejmującymi szeroki zakres nienaruszonych próbek różnych rodzajów skał [18].

Parametry statyczne, brane pod uwagę podczas obliczeń stateczności, opisujące wytrzymałość modelu określa się za pomocą indeksu GSI (ang. Geological Strength Index), opartego na stałej materiałowej  $m_i$  zależnej od budowy litologicznej warstwy oraz wskaźnika D (ang. Disturbance Factor) dobieranego odpowiednio do stopnia naruszenia górotworu poprzez prace inwazyjne takie jak tunelowanie czy wydobywanie odkrywkowe.

#### 5.2.4. Zakres i metodyka wykonanych obliczeń

Dla określenia stateczności zbocza, analizę numeryczną przeprowadzono wzdłuż profili osuwiskowych nr I-I', II-II', III-III', IV-IV' oraz V-V'. Konstrukcje przekrojów obliczeniowych (tabela 5.1) wykonano na podstawie odpowiadającym im przekrojom geotechnicznym na obrazach sejsmicznych przedstawionych na załącznikach 3.1-3.5 oraz 4.1-4.5. Modele obliczeniowe pierwotne i wtórne przedstawiono na załączniku 5.1-5.5, a ich lokalizacje są tożsame z przebiegami profili sejsmicznych przedstawionych na mapie dokumentacyjnej, stanowiących załącznik nr 2.

Tabela 5.1. Zestawienie przekrojów obliczeniowych

Nazwa przekroju obliczeniowego	Długość przekroju [m]
Przekrój I-I'	255,0
Przekrój II-II'	255,0
Przekrój III-III'	255,0
Przekrój IV-IV'	255,0
Przekrój V-V'	390,0
Całkowita długość przekrojów	1410,0

Parametry warstw przyjętych do obliczeń stateczności zostały dostarczone przez Zleceniodawcę [1], z wyjątkiem porowatości, potrzebnej do wariantów zawodnionych, przyjęto metodę „C” [5,6]. Dla celów analizy stateczności wprowadzono warstwę obliczeniową „droga”, dla nasypów drogowych, „mur”, dla wszystkich konstrukcji murów z bloczków betonowych wraz z ich betonowym fundamentem (tabela nr 5.4), zgodnie z projektem [2], a także wzmocnione geowłókniną warstwy nasypowe przy murach. Te ostatnie uzyskały dopisek „geo” i wzmocnienie kąta tarcia i spójności o 20 %, co odbyło się w wyniku kalibracji statecznościowej najwyższego i najbardziej podatnego na zniszczenie muru, znajdującego się na przekroju V-V', na metrażu 248,5.

Polska norma PN-81-B-03020 określa parametry wytrzymałościowe przyjęte w obliczeniach (parametry obliczeniowe) jako wynik przemnożenia parametrów geotechnicznych charakteryzujących ośrodek gruntowy przez współczynnik materiałowy  $\gamma_m$  wynoszący 0,9 dla spójności i kąta tarcia. Parametry obliczeniowe warstw geotechnicznych dla gruntów, według kryterium wytrzymałościowego Mohra-Coulomba zostały poddane przeliczeniu i przedstawione w tabeli 5.2. Parametry obliczeniowe warstw geotechnicznych dla skał, według kryterium wytrzymałościowego Hoeka-Browna przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.2. Parametry obliczeniowe warstw geotechnicznych dla gruntów

Symbol warstwy geotechnicznej	Symbol gruntu	Stan gruntu	Gęstość obj. $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Spójność $c$ [kPa]	Kąt tarcia $\phi$ [°]	Porowatość [-]
droga	-	-	2140	80,0	50,0	0,30
mur	-	-	3000	1500,0	60,0	0,10
N1geo	$G\pi, G\pi Z$	-	2180	24,9	17,0	0,25
N1ageo	$G\pi$	-	2000	13,2	9,6	0,25
N2geo	$Pg, Pog$	-	2150	14,0	14,0	0,25
N3geo	$G\pi, II, Pg, G\pi + G\pi ZPs$	-	2296	36,2	17,9	0,25

Symbol warstwy geotechnicznej	Symbol gruntu	Stan gruntu	Gęstość obj. $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Spójność $c$ [kPa]	Kąt tarcia $\phi$ [°]	Porowatość [-]
N4geo	G $\pi$ Z	-	2150	12,9	12,9	0,25
N5geo	G $\pi$ Z, G $\pi$ Z//G $\pi$	-	2296	5,0	17,3	0,25
N6geo	Ps, Ps+Gp	-	1870	5,0	44,9	0,22
N7geo	Po, Po+G	-	1870	5,0	38,9	0,25
N1	G $\pi$ , G $\pi$ Z	pl	2180	20,8	14,2	0,28
N1a	G $\pi$	mpl	2000	11,0	8,0	0,30
N2	Pg, Pog	pl	2150	11,7	11,7	0,28
N3	G $\pi$ , II, Pg, G $\pi$ +G $\pi$ ZPs	tpl	2296	30,1	14,9	0,25
N4	G $\pi$ Z	pl	2150	10,8	10,8	0,28
N5	G $\pi$ Z, G $\pi$ Z//G $\pi$	tpl	2296	19,8	14,4	0,25
N6	Ps, Ps+Gp	szg	1870	-	28,8	0,22
N7	Po, Po+G	ln	1870	-	32,4	0,25
N8	Po, Po+G	szg	1925	-	34,2	0,25
Ia-K	G $\pi$ //II	mpl	2090	13,7	9,5	0,30
Ib-K	G $\pi$ , G $\pi$ +H, G $\pi$ +Ż, G $\pi$ +H+Ż, II, Gp	pl	2200	26,2	15,1	0,25
Ic-K	G $\pi$ , G $\pi$ +Ż, G $\pi$ +H, G $\pi$ +H+Ż, G $\pi$ //G $\pi$ Z, II, II//Gp+Ps, Żg	tpl	2310	26,2	15,1	0,22
Ila-K	G $\pi$ Z, G $\pi$ Z+Ż, G $\pi$ /Nmg, Gz, Gz+Ż, GzH/Nmg	pl	2090	12,9	12,3	0,25
Ilb-K	G $\pi$ Z, G $\pi$ Z+Ż, G $\pi$ Z+H, G $\pi$ ZH/Nmg//Ż, Gz, Gz+Ż, GzH/Nmg	tpl	2200	17,8	14,2	0,22
III-K	Kwg(Gz)	mpl	2200	14,3	11,3	0,35
IVa-K	I, I//G $\pi$ Z+Ż, I//G $\pi$	tpl	2200	48,9	10,5	0,18
IVb-K	I, I+KRpc, I//IŁ, I+H, I//II	pzw	2200	61,5	12,1	0,15
Vc-K	Ż+G, Ż+Pr	szg	2090	-	34,7	0,27
Ia	G $\pi$ +H	mpl	2090	13,7	9,5	0,28
Ib	G $\pi$ , G $\pi$ +Ż, G $\pi$ +H, G $\pi$ +H+Ż, II, II+Ż, II+H, GH, Żg, Gp+Ż, Gp+KRpc	pl	2200	11,7	11,7	0,23
Ic	G $\pi$ , G $\pi$ +Ż, G $\pi$ +H, G $\pi$ /G $\pi$ Z, II, Żg, Pog	tpl	2310	30,2	17,9	0,20
Id	Żg, Pog	pzw	2420	27,0	16,2	0,18
Ila	G $\pi$ Z, Gz, G $\pi$ Z+Ż, G $\pi$ Z+H+Ż	pl	2090	12,1	11,9	0,23
Ilb	G $\pi$ Z, G $\pi$ Z+H+Ż, G $\pi$ Z+Ż, G $\pi$ Z/I+Ż, Gz, Gz+Ż, Gpz/Ip	tpl	2200	34,6	11,5	0,20
IVa	I, I+H, I+KRpc, I//Nmg, I $\pi$	tpl	2200	50,4	10,8	0,17
IVb	I, I//IŁ, I//IŁ	pzw	2200	60,6	11,9	0,14
Va	Ż, Ż+KO	szg	2255	-	34,9	0,25
Vb	Ż, Ż+KO+G, Ż//Nmg	zg	2310	-	35,8	0,22
Vc	Ż+G, Po	szg	2090	-	34,7	0,25
Vd	Ż+G, Ż//G, Po	zg	2035	-	36,7	0,22

Tabela 5.3. Parametry obliczeniowe warstw geotechnicznych dla skał

Symbol warstwy geotechnicznej	Symbol skały	Gęstość obj. $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie $R_c$ [kPa]	GSI [-]	$m_i$ [-]	D [-]	Porowatość [-]
VI	IŁ, IŁ//pc, IŁ+KRpc, IŁ/IŁ, IŁ/I	2294	6400	50	5,0	0	0,25



Analizując dane geotechniczne z wierceń archiwalnych [1], nie stwierdzono wysokiego poziomu spękania w warstwach skalnych (warstwa geotechniczna nr VI). Do obliczeń przyjęto zatem indeks spękania GSI taki jak dla skał średnio spękanych wynoszący 50.

Wszystkie pięć przekrojów zostało przeliczone pod kątem stateczności w 5 stanach obliczeniowych, w ramach analizy naprężeń pierwotnych (przed robotami budowlanymi) oraz wtórnych (po deniwelacji terenu oraz konstrukcji podpór i murów). Dla jak najdokładniejszego odwzorowania topografii terenu w etapie naprężeń wtórnych, wykonano pomiary geodezyjne, opisane w rozdziale 4.2.6. Dla modelu I-I', IV-IV' oraz V-V' (górna podpora) zdecydowano się na usunięcie dodatkowych podpór ziemnych, usypanych u podnóża murów po pojawieniu się zmian osuwiskowych, gdyż były one na tyle istotne, że zaburzały wyniki obliczeń stateczności. W tabeli 5.4 przedstawiono założenia projektowe [3], użyte do modelowania, dla poszczególnych podpór ziemnych, bez części naziemnych, z których zrezygnowano jeszcze na etapie budowy.

Tabela 5.4. Zestawienie użytych założeń projektowych dla podpór ziemnych

Nazwa przekroju obliczeniowego	Typ podpory wg [3]	Wysokość muru bez fundamentu [m]	Metraż muru na przekroju [m]
Przekrój I-I'	Typ 18	6,0	26,1
Przekrój II-II'	-	-	-
Przekrój III-III'	Typ 15	5,4	31,2
Przekrój IV-IV'	Typ 22	6,8	130,0
Przekrój V-V' (podpora górna)	Typ 22	6,8	248,5
Przekrój V-V' (podpora dolna)	Typ 2	2,8	147,7

Do rekonstrukcji ukształtowania terenu dla etapu naprężeń pierwotnych, wykorzystano mapę do celów projektowych, otrzymaną od Zleceniodawcy [3]. Stany obserwowane odpowiadają warunkom geologicznym oraz hydrogeologicznym, napotkanym podczas wierceń archiwalnych [1], natomiast stany zawodnione symulują wypełnienie w 100% porów wszystkich warstw wodą do przyjętego poziomu lustra wody. Woda stanowi istotny element poziomu stateczności, dlatego jej uwzględnienie przy najbardziej niekorzystnych warunkach atmosferycznych jest bardzo istotne. Stan z obciążeniem drogowym i budowlanym reprezentuje przybliżone naciski statyczne od istniejących dróg wewnętrznych na poziomie 120 kN/oś pojazdu oraz symuluje naciski od obszarów planowanej zabudowy odpowiednio 120 kN/m<sup>2</sup> dla projektowanych parkingów i 300 kN/m<sup>2</sup> dla projektowanych budynków. Obszary te zaznaczono na mapie dokumentacyjnej kolorami zielonymi i pomarańczowymi (zał. 2), a także naniesiono je na modele obliczeniowe (zał. 5.1-5.5). Obliczenia stateczności wykonano przy użyciu jednorodnej siatki obliczeniowej o oczku 0,25 x 0,25 m, by odwzorować wszelkie, nawet najcieńsze warstwy modeli.

### 5.2.5. Wyniki obliczeń stateczności

Dla analizowanych przekrojów obliczeniowych uzyskano w sumie 25 współczynników bezpieczeństwa F, w ramach opisanych w rozdziale 5.2.4 etapów i stanów, które zestawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Wielkość współczynnika bezpieczeństwa F

	<b>Etap obliczeń</b>	<b>Stan ośrodka</b>	<b>Współczynnik bezpieczeństwa F [-]</b>
<b>Przekrój I-I'</b>	pierwotny	obserwowany	4,78
		zawodniony	3,44
	wtórny	obserwowany	1,32
		zawodniony	0,86
		zawodniony <i>z obciążeniem drogowym i budowlanym</i>	0,43
<b>Przekrój II-II'</b>	pierwotny	obserwowany	2,86
		zawodniony	2,10
	wtórny	obserwowany	3,65
		zawodniony	2,51
		zawodniony <i>z obciążeniem drogowym i budowlanym</i>	1,16
<b>Przekrój III-III'</b>	pierwotny	obserwowany	5,25
		zawodniony	3,97
	wtórny	obserwowany	1,01
		zawodniony	0,66
		zawodniony <i>z obciążeniem drogowym i budowlanym</i>	0,29
<b>Przekrój IV-IV'</b>	pierwotny	obserwowany	3,92
		zawodniony	2,85
	wtórny	obserwowany	1,04
		zawodniony	0,74
		zawodniony <i>z obciążeniem drogowym i budowlanym</i>	0,49
<b>Przekrój V-V'</b>	pierwotny	obserwowany	3,14
		zawodniony	2,35
	wtórny	obserwowany	1,22
		zawodniony	0,69
		zawodniony <i>z obciążeniem drogowym i budowlanym</i>	0,49 i 0,61

Na załącznikach 6.1.1-6.3.5 przedstawiono rozkłady wskaźników deformacji ze ścinania wyrażoną w [Pa]. Są to wskaźniki, na których uwidaczniają się ewentualne płaszczyzny poślizgu oraz inne deformacje w modelach, spowodowane pracą masywu gruntowo-skalnego i nagromadzeniem się naprężeń ścinających. W zależności od warunków brzegowych i początkowych, uwidaczniają się różne potencjalne płaszczyzny poślizgu.

### 5.3. Interpretacja wyników

Analizując wyniki stateczności, zamieszczone w tabeli 5.5 uwagę zwraca fakt, że wszystkie przekroje w etapie naprężeń pierwotnych wykazują wysokie współczynniki bezpieczeństwa F powyżej 2, co oznacza, że są stateczne i to ze znaczną rezerwą. Do

uznania zbocza za stateczne przyjmuje się wartość  $F$  powyżej 1. Porównując wskaźniki z etapu pierwotnego dla stanu obserwowanego można zauważyć, że dla 3 przekrojów uzyskano współczynniki bezpieczeństwa przekraczające (lub zbliżone) wartość 4. Odpowiadające im płaszczyzny poślizgu, widoczne na załącznikach 6.1.1, 6.1.3 oraz 6.1.4, są głębsze, sięgające maksymalnie stropów skały (warstwa VI). Wyjątkiem są przekroje II-II' oraz V-V', gdzie poziom współczynnika  $F$  jest nieco niższy, lecz i tak wysoki, a dodatkowo płaszczyzny poślizgu są lokalne przypowierzchniowe, sięgające zaledwie 2-3 metrów głębokości (zał. 6.1.2 i 6.1.5). Należy zaznaczyć, że stan ten opisuje warunki hydrogeologiczne z uwzględnieniem wody napotkanej podczas wierceń archiwalnych. Podczas stanu zawodnionego modele dociążono maksymalnie wodą gruntową i atmosferyczną, co spowodowało obniżenie współczynnika  $F$  średnio o około 25 % dla wszystkich przekrojów, nadal pozostających statecznymi.

Tak wysokie poziomy stateczności jasno wskazują na ustabilizowanie się zbocza, a w przypadku bardzo intensywnych opadów atmosferycznych, mogą jedynie pojawić się nieznaczące dla stateczności zsuwy powierzchniowe. Nie bez znaczenia ma poziomy układ warstw nośnych, które posiadają duży margines wytrzymałości na obciążenia.

Etap naprężeń wtórnych reprezentuje ukształtowanie terenu po pracach deniwelacyjnych oraz po wykonaniu podpór wraz z murami. Do analogicznych jak w przypadku etapu pierwotnego stanów obserwowanych i zawodnionych dołożono stan zawodniony z uwzględnieniem dróg istniejących, parkingów oraz projektowanych budynków. Już w stanie obserwowanym obliczenia wykazały niskie współczynniki bezpieczeństwa dla wszystkich przekrojów, nieznacznie powyżej 1. Wyjątkiem jest przekrój II-II', który jak już wspomniano wcześniej, nie posiada muru ani podpory gruntowej, a zmiany deniwelacyjne wykonano w znacznie mniejszym zakresie, dokładając jedynie warstwę nasypową N1 i N3 o miąższości do 1-2 metrów. Spowodowało to poprawę jego współczynnika bezpieczeństwa w stosunku do etapu pierwotnego o około 20 %, sięgając wartość 2,51 dla stanu zawodnionego wtórnego, wskazując charakter płaszczyzny poślizgu jako przypowierzchniowy. Ma to miejsce na początku modelu, gdzie znajdują się największe spadki terenu na tym przekroju, w warstwach nasypowych N3 oraz N8.

Wracając do pozostałych przekrojów obliczeniowych wszystkie one cechuje całkowitą utratą stateczności w stanie zawodnionym etapu wtórnego. Uzyskane współczynniki stateczności mieszczą się w zakresie 0,66-0,86. Odpowiadające im płaszczyzny poślizgu zlokalizowane są bezpośrednio w obrębie murów oraz podpór ziemnych z warstwami geowłóknin. Mają one kształt półkolisty a ich „wyjście” na powierzchnię terenu znajduje się w odległości około od 3 do 5 metrów od murów. Takie wyniki jednoznacznie wskazują na poddanie się siłom grawitacyjnym murów i nasypów przy murach, które dociążone wodą zaczynają wybrzuszać i podcinać fundamenty murów, tworząc obserwowane w terenie

płaszczyzny odklucia i na powierzchni oraz wyboczenia górnych części konstrukcji murów. Trzeba zaznaczyć że projekt zabezpieczenia zakładał, że warstwy „geo” MUSZA być wykonane z gruntów niespoistych zagęszczonych warstwowo do osiągnięcia  $I_s > 0,97$  o kącie tarcia wewnętrznego minimum 34 stopnie. W rzeczywistości, w otworze archiwalnym A5 nawiercono praktycznie same grunty spoiste lub z domieszkami glin i pyłów. A zatem zachowanie się takich gruntów nasypowych, wzmocnionych geowłókninami jest całkiem inne. Grunty te będą zatykać dreny i przy intensywnych opadach wypływać spod geowłóknin. Można zatem przypuszczać, że 20 % wzmocnienie, które uzyskały warstwy obliczeniowe z dopiskiem „geo”, a nie są gruntami niespoistymi, jest przeszacowane.

Na załącznikach 6.3.1-6.3.5 ukazano deformacje ze ścinania dla końcowego stanu obliczeniowego wtórnego zawodnionego z uwzględnieniem obciążeń statycznych od dróg, parkingów i budynków. Nacisk obciążeń zadanych bezpośrednio przy murach, skutkuje jeszcze większym obniżeniem współczynników bezpieczeństwa  $F$  do poziomu zawierającego się w przedziale od 0,29 do 0,61 (tabela 5.5). Dla przekroju obliczeniowego V-V' (zał. 6.3.5) wyszczególniono wskaźniki bezpieczeństwa  $F$  dla obu podpór gruntowych, wynoszące odpowiednio 0,49 dla niższej oraz 0,61 dla wyższej. Wyniki te wskazują, że po wprowadzeniu obciążeń, stateczność niższej podpory jest mniejsza niż wyższej, a w stanach obserwowanym i zawodnionym (zał. 6.2.5), to wyższa skarpa uzyskała najslabsze wyniki.

Bardzo niskie wartości, które jednoznacznie wskazują na brak wytrzymałości tych podpór gruntowych i murów na projektowane obciążenia. Wyjątkiem tutaj jest przekrój II-II', gdzie nie ma muru oraz podpory gruntowej, a model zachowuje stateczność nawet dla tego najbardziej niekorzystnego stanu obliczeniowego osiągając wynik  $F=1,16$  i to w miejscu nasypu drogowego, daleko od zbocza, wynikającego z wypychania słabych, przypowierzchniowych gruntów, znajdujących się tam na obecną chwilę. Przy podjęciu prac budowlanych w przyszłości, sposoby posadowienia obiektów powinny odbywać się w gruntach nośnych.

## 6. Podsumowanie

Niniejsze opracowanie wykonano na zlecenie Gminy Andrychów, ul. Rynek 15, 34-120.

Celem przeprowadzonych prac była analiza stateczności osuwiska w 5 przekrojach geotechnicznych na podstawie modelowania numerycznego z wykorzystaniem nieinwazyjnych i ciągłych badań geofizycznych metodą sejsmiczną oraz archiwalnych badań geotechnicznych.

Badania geofizyczne przeprowadzono w rejonie osuwiska na terenie działek inwestycyjnych na zbiegu ulic: Przemysłowej, Strefowej i Biała Droga, w miejscowości Andrychów, gmina Andrychów, powiat wadowicki, województwo małopolskie. Badania

geofizyczne zostały przeprowadzone metodą sejsmiczną technikami tomografii refrakcyjnej 2D i MASW 2D, wzdłuż 6 profili pomiarowych.

Badania przeprowadzono w dniach 21, 22 oraz 29 maja 2020 r.

Na podstawie przeprowadzonych geofizycznych badań metodą sejsmiczną technikami MASW oraz tomografii refrakcyjnej, w korelacji z badaniami geotechnicznymi, dokonano interpretacji geotechniczno-geofizycznej. Były one podstawą do opracowania 5 numerycznych modeli masywu gruntowo-skalnego i przeprowadzenia dla nich analiz stateczności. Analiza ta była przeprowadzona dla 5 stanów ośrodka, podzielonych na 2 etapy (pierwotny i wtórny).

Dla analizowanych przekrojów obliczeniowych określono położenie potencjalnych płaszczyzn poślizgu (płytkich lub głębokich – w zależności od etapu i stanu) oraz obliczono w sumie 25 współczynników bezpieczeństwa i wskazano na odpowiadające im przebiegi płaszczyzn poślizgu.

Wyniki ukazały brak ruchów osuwiskowych w podłożu gruntowo-skalnym, a uwidoczniły nieodpowiednie zabezpieczenie nasypów, i skarp poprzez podpory gruntowe wykończone murami. Wyniki badań i obliczeń powinny zostać wykorzystane do optymalizacji zakresu projektowanych prac geotechnicznych, budowlanych oraz finalnej koncepcji zabezpieczenia przed dalszymi, niekorzystnymi procesami osuwiskowymi w gruntach nasypowych.

## 7. Literatura oraz materiały archiwalne

- [1] Geoprofil, Usługi Geologiczne i Inżynierskie Paweł Różański: DOKUMENTACJA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKA dla projektu budowlanego projektowanej budowy obiektów inżynierskich w miejscu istniejących ścian oporowych, które uległy awarii oraz przebudowy nasypów drogowych i infrastruktury podziemnej na działkach nr 5971, 6902, 6904, 6974, 5970/1, 5970/2, 6001/2, 6156/8, 6897/1, 6897/2, 6898/1, 6898/2, 6899/1, 6899/2, 6900/3, 6900/4, 6900/5, 6900/6, 6901/1, 6901/3, 6901/4, 6903/1, 6903/2, 6905/1, 6905/5, 6905/6, 6905/7, 6905/8, 6905/9, 6905/10, 6905/11, 6906/1, 6906/3, 6906/4, 6907/3, 6907/4, 6907/5, 6907/6, 6973/1, 6973/2, 6975/1, 6975/2, 3011/13. Andrychów, wrzesień 2019.
- [2] Techmap Kielce Sp. z o.o.: PROJEKT ARCHITEKTONICZNO – BUDOWLANY BRANŻA KONSTRUKCYJNA MUR OPROWY. Kielce, luty 2018.
- [3] Techmap Kielce Sp. z o.o.: PROJEKT BUDOWLANY. Kielce, marzec 2018.
- [4] Techmap Kielce Sp. z o.o.: Mapy sytuacyjno-wysokościowe projektu budowlanego MURU OPROWEGO 1, MURU OPROWEGO 2, MURU OPROWEGO 3. Kielce, styczeń 2018.
- [5] PN-B-06050 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne. Warszawa, 1999.

- [6] PN-83/B-03010. Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] PN-B-02479:1998 Geotechnika - Dokumentowanie geotechniczne - Zasady ogólne.
- [8] PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [9] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. (Dz. U. z dnia 14 maja 1999 r.).
- [10] Książkiewicz 1951- Objąsnienia arkusza Wadowice (pas 49, słuł 29). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- [11] Boratyn J., Kasina K. 2011 – Objąsnienia do Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi, gmina Andrychów. Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa.
- [12] Ryłko W., 2009a – Objąsnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:5 0 000, Arkusz Wadowice (994), PIG CAG, Warszawa.
- [13] Wójcik A., Szydło P., Marciniec P., Nescieruk P., 1999 – Sfałdowany miocen rejonu andrychowskiego – nowa jednostka tektoniczna. Prace PIG, 158: 231–248.
- [14] Bojakowska I., Gałka M., Krieger W., Lis J., Pasieczna A., Salamon E., Strzemińska K., Truszel M., Wołkowicz S., 2004\*- Objąsnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski Arkusz Wadowice (994), Warszawa.
- [15] Billington N. et al.: 2D MASW surveys to evaluate subsurface stiffness. 7<sup>th</sup> Annual Technical Forum. Schnabel Engineering. 2007.
- [16] Stokoe K.H. II Rix G.J., Nazarian S., In Situ Seismic Testing with Surface Waves, Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro. 13-18 August, 1989. 331-334.
- [17] FLAC User's Manual: Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis 2016.
- [18] Eberhardt E.: The Hoek-Brown Failure Criterion, grudzień 2012.

## 8. Terenowa dokumentacja fotograficzna



lipiec 2020 r