

Badania sejsmiczne w ocenie podłoża i stanu budowli hydrotechnicznych

Seismic methods for investigating hydraulic structures

Szymon OSTROWSKI, Marcin LASOCKI

*Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska*

Streszczenie

W artykule omówiono problematykę sejsmicznych badań geofizycznych stosowanych w geologii inżynierskiej i ich możliwe aplikacje do zadań związanych z oceną stanu technicznego budowli hydrotechnicznych. Przedstawiono założenia teoretyczne metod sejsmicznych oraz powiązanie wyników badań z parametrami mechanicznymi badanego ośrodka. Scharakteryzowano techniki, które mają największy potencjał aplikacyjny, tj.: prześwietlenia sejsmiczne, sejsmiczną tomografię refrakcyjną i wielokanałową analizę fal powierzchniowych (MASW). W referacie zawarto przykłady zastosowania tych technik do diagnozy budowli hydrotechnicznych. Prześwietlenia sejsmiczne pozwoliły na rozpoznanie stanu technicznego dolnej części korpusu zapory betonowej; sejsmicznej tomografii refrakcyjnej użyto do przestrzennego rozpoznania budowy geologicznej otoczenia zapory; technikę MASW zastosowano do rozpoznania szczegółów konstrukcji małej zapory ziemnej.

1. Wprowadzenie

Bezinwazyjne badania sejsmiczne stanowią rozległą grupę geofizycznych metod badawczych, które mają szerokie zastosowanie w różnych gałęziach geologii. Pierwotnie były one najczęściej wykorzystywane w geologii poszukiwawczej, szczególnie do poszukiwania węglowodorów. Jednak wraz z postępującą miniaturyzacją i spadkiem cen systemów pomiarowych opartych na współczesnych komputerach, a także z bezprecedensowym wzrostem dostępności mocy obliczeniowej, która jest konieczna do przetwarzania wyników, badania sejsmiczne zaczęły być coraz bardziej powszechne w geologii inżynierskiej, szczególnie w aspekcie stabilności zboczy [np. Bestyński, Thiel 1999; Huang i in. 2012; Uhlemann i in. 2016], hydrogeologii, geologii strukturalnej [np. Ostrowski i in. 2016] i innych dziedzinach. Obecnie w wielu zadaniach związanych z projektowaniem i monitoringiem obiektów inży-

nierskich, rutynowo stosuje się poza innymi, pośrednimi i bezpośrednimi metodami badawczymi, różne techniki badań sejsmicznych.

2. Czynniki decydujące o prędkości fal sejsmicznych, a możliwość wykorzystania sejsmiki inżynierskiej

Kluczowym czynnikiem, który pozwala na wykorzystanie badań sejsmicznych w badaniach podłoża, szczególnie w zakresie badań inżynierskich, jest prawidłowość mówiąca, iż prędkość fal sejsmicznych dla danego materiału zależna jest od jego gęstości i parametrów mechanicznych [Yilmaz 2015]. Zasada ta ma również zastosowanie w badaniach materiałowych (inżynierii materiałowej), np. przy określaniu sztywności, sprężystości materiałów, obecności mikrozniszczeń i bezinwazyjnego szacowania wytrzymałości materiałów. W przypadku analizy wykonywanych dla potrzeb geologii, materiał badany (nazywany ośrodkiem geologicznym) jest przeważnie ośrodkiem wielofazowym, zawierającym fazę stałą (ziarna mineralne), ciekłą (wody porowe) i gazową. Fale sejsmiczne w ośrodku wielofazowym rozchodzą się w sposób bardziej skomplikowany niż w przypadku obiektów jednofazowych, jednak zależności prędkości od gęstości (objętościowej) i parametrów mechanicznych pozwalają na wykorzystanie badań sejsmicznych do określania składu i parametrów mechanicznych ośrodka. Dodatkową, istotną różnicą pomiędzy badaniami materiałowymi a badaniami ośrodka geologicznego jest skala przestrzenna. Badania inżynierii materiałowej wykonywane są zwykle na homogenicznych próbkach materiału w laboratoriach, podczas gdy badania ośrodka geologicznego obejmują znacząco większą przestrzeń, zwykle zbudowaną z wielu warstw lub stref o zróżnicowanych wartościach parametrów mechanicznych. Podział pomiędzy badaniami materiałowymi a badaniami geofizycznymi podłoża często się zaciera – te pierwsze wykonywane są na coraz bardziej skomplikowanych elementach konstrukcji, drugie natomiast obejmują fragmenty konstrukcji, traktując je jak inne obiekty podłoża, o specyficznych parametrach mechanicznych (szczególnie w zastosowaniach inżynierskich). Istotną różnicą pomiędzy badaniami materiałowymi a sejsmicznymi badaniami geofizycznymi jest częstotliwość wykorzystanych fal – dla badań sejsmicznych stosuje się zwykle fale o niskich częstotliwościach, w zakresie od kilkunastu do kilkuset herców, podczas gdy w badaniach materiałowych – fale o wysokich częstotliwościach, aż do ultradźwięków.

W sejsmicznych badaniach geofizycznych podstawowym efektem pomiarów i podstawą do interpretacji parametrów mechanicznych oraz rozmieszczenia obiektów o różnych parametrach w ośrodku geologicznym jest pole prędkości fal sejsmicznych. Pole to określa wartości prędkości, z jakimi przemieszcza się fala sprężysta w danym miejscu w przestrzeni geologicznej. Wielkości te w minimalnym stopniu zależą od częstotliwości fali, w głównej mierze pozostając w relacji z parametrami mechanicznymi ośrodka, które z kolei są pochodną składu mineralnego ziaren i sposobu ich połączenia, porowatości i stopnia jej wypełnienia płynami,

obecności spękań i wielu innych cech. Wartości prędkości różnią się natomiast w danym typie ośrodka w zależności od typu fal. Wyróżnia się dwa podstawowe typy fal sejsmicznych: kompresyjne (fale P), w których drgania cząstek ośrodka są równoległe do kierunku rozchodzenia się fali (odpowiadają one falom akustycznym w powietrzu), a ich prędkość jest silnie skorelowana z gęstością objętościową; oraz poprzeczne (fale S), w których drgania są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fal. Fale takie propagują jedynie w ośrodkach mających przynajmniej sztywną sztywność (ośrodkach stałych), w związku z tym nie przemieszczają się przez gazy i ciecze. Są one również wolniejsze od fal P. Prędkość fal S jest silnie skorelowana ze sztywnością ośrodka, a w małym stopniu zależy od gęstości objętościowej. W badaniach geofizycznych wykonywanych dla celów inżynierskich szczególnie korzystne jest równoczesne określenie pola prędkości obu typów fal – wartości fali P pozwalają oszacować zmiany gęstości objętościowej, a wartości fal S charakteryzują sztywność ośrodka. Porównanie obu tych wielkości pozwala na wnioskowanie o plastyczności oraz nasyceniu ośrodka wodą. Badania fal S są jednak technicznie bardziej skomplikowane, co powoduje, że często wykonywane są jedynie badania wykorzystujące falę P.

Określenie lokalnych wartości prędkości fal sejsmicznych w przestrzeni w ośrodku geologicznym można technicznie uzyskać na kilka sposobów. W praktyce, w zastosowaniach inżynierskich, popularność uzyskały trzy główne techniki oparte na różnych zjawiskach fizycznych: sejsmika fal bezpośrednich (określana jako prześwietlania sejsmiczne), sejsmika refrakcyjna (w tym wersja tomograficzna) i sejsmika fal powierzchniowych (z najpopularniejszą techniką MASW). W dalszej części artykułu rozwiązania te, wraz z założeniami metodycznymi i rezultatami, zostaną omówione na realnych przykładach zastosowania w celach rozpoznania budowli hydrotechnicznych.

3. Zastosowanie prześwietlań sejsmicznych do oceny stanu technicznego dolnej części zapory betonowej

Technika prześwietlań sejsmicznych wykorzystuje obserwacje rozchodzenia się fal bezpośrednich (przede wszystkim fal P) w ośrodku do określenia pola prędkości, a następnie na podstawie zmienności tego pola pozwala wnioskować o składzie czy stopniu zniszczenia ośrodka [Angioni i in. 2003]. Badania realizuje się dla obiektów (naturalnych lub wzniesionych przez człowieka), na których możliwe jest rozmieszczenie elementów układu pomiarowego – optymalnie wzdłuż równoległych powierzchni. Wykorzystuje się naturalne lub sztuczne ściany, powierzchnie wyrobisk lub otwory wiertnicze. Pomiar wygląda w ten sposób, że z jednej strony obiektu instaluje się sieć czujników fali sejsmicznej (geofony lub hydrofony), a po przeciwnej generuje impuls fali sejsmicznej. Określenie czasu przejścia fali wzdłuż linii łączącej punkt generacji (tzw. źródło) i punkt odbioru, przy znanej długości linii, pozwala na określenie średniej prędkości fali sejsmicznej (tzw. promienia sejsmicznego).

Pojedynczy pomiar, dokonany dla jednej lokalizacji źródła, daje zwykle wynik dla kilkunastu linii łączących źródło i kolejne elementy systemu odbiorników, ale uzyskane prędkości są nadal prędkościami średnimi dla kolejnych promieni sejsmicznych. Dopiero wykonanie pomiarów dla wielu punktów źródłowych, pokrywających dostępną przestrzeń licznymi, krzyżującymi się promieniami, pozwala na wykonanie modelowania pola prędkości w przestrzeni odpowiadającej badanemu obiektowi.

Badania techniką prześwietłań sejsmicznych wykonano na zaporze betonowej Besko w Sieniawie, zbudowanej na rzece Wisłok w Beskidzie Niskim. analizy przeprowadzono w celu oceny stanu najniższej części korpusu, stanu przesłony wykonanej w podłożu oraz wykrycia ewentualnych niejednorodności w strefie kontaktu stopy zapory i podłoża, gdyż w części piezometrów zainstalowanych w podłożu notowano podwyższone wartości ciśnienia.

Do badań sejsmicznych zostały wykorzystane otwory drenażowe dostępne z poziomu galerii dolnej i sięgające od kilku do kilkunastu metrów poniżej stopy korpusu. W jednym z nich umieszczono układ odbiorników (hydrofonów) rozłożonych co 0,5 m, a w sąsiednim otworze generowano impuls sejsmiczny (na całej długości otworu co jeden metr) za pomocą silnego wyładowania elektrycznego. Procedura pozwalała na pokrycie płaszczyzny między otworami licznymi, krzyżującymi się promieniami sejsmicznymi. Pomiarzy zostały wykonane dla czterestu, częściowo zachodzących na siebie, płaszczyzn. Określenie względnego położenia wszystkich punktów wzbudzenia i odbioru (określenia długości promieni sejsmicznych) wymagało pomiaru nachylenia i kierunku otworów. Wykonane modelowanie pozwoliło uzyskać przekrój pola prędkości fali P, wzdłuż powierzchni zawierającej wszystkie punkty wzbudzenia i odbioru (rys. 1), dla wschodniej części zapory. Na podstawie przekroju przeprowadzono interpretację stanu technicznego dolnej części korpusu i podłoża. Wartości prędkości w zakresie 3,5-4,5 km/s, zanotowane w dolnej części betonowego korpusu zapory, odpowiadają wartościom typowym dla konstrukcji betonowych. Jedyne nieznaczne obniżenie tych wielkości zanotowano w sekcji czwartej i lokalnie w sekcji drugiej, co może wskazywać na występowanie lokalnej degradacji betonu. Zmienność wartości prędkości zanotowana w podłożu zapory jest wynikiem dużej zmienności litologicznej. Obszar ten zbudowany jest ze stromo nachylonych na południe piaskowcowo-łupkowych warstw krośnieńskich [Wdowiarski i in. 1988]. Najwyższe prędkości notowane w podłożu zapory wiążą się przypuszczalnie z obecnością pakietów gruboławicowych piaskowców. Spękania obecne w takich pakietach zwykle decydują o podwyższonej przepuszczalności. Obecność w podłożu spękanych, przepuszczalnych warstw, będących w łączności hydraulicznej ze zbiornikiem, w połączeniu ze stopniową deterioracją betonu może być odpowiedzialna za wzrost przepuszczalności i stopniowy wzrost ciśnienia w piezometrach.

4. Wykorzystanie sejsmicznej tomografii refrakcyjnej do rozpoznania budowy geologicznej podłoża

W odróżnieniu od techniki prześwietłań sejsmicznych, badania sejsmiki refrakcyjnej pozwalają na rozpoznanie pola prędkości poniżej powierzchni terenu bez dostępu w głąb podłoża. Opierają się one na zjawisku ugięcia i refrakcji fal sejsmicznych na granicach warstw o różnych wartościach prędkości [np. Sheehan i in. 2005]. Jeśli promień sejsmiczny skośnie przekracza granicę, na której zachodzi zmiana wartości prędkości fal, wówczas zmienia się jego przebieg o kąt proporcjonalny do zmiany wartości prędkości występującej na granicy i kąta padania (zachodzi ugięcie promienia). Dla granicznej wartości różnicy wielkości prędkości i kąta padania, promień sejsmiczny zaczyna biec równoległe do granicy (zachodzi refrakcja promienia). W naturalnych warunkach geologicznych obserwuje się zwykle wzrost prędkości fal sejsmicznych wraz z głębokością. W takich przypadkach następuje ugięcie skośnych promieni sejsmicznych najpierw w kierunku horyzontalnym, powstanie zjawiska refrakcji i ostatecznie powrót promienia w stronę powierzchni, gdzie może on być zarejestrowany przez system pomiarowy, który zapisuje opóźnienie pomiędzy emisją sygnału a jego odbiorem. System ten składa się zwykle z kilkudziesięciu odbiorników rozmieszczonych w regularnych odstępach, a sygnał emituje się w kolejnych punktach wzdłuż profilu. Określenie opóźnienia dotarcia sygnału dla licznych par źródło-odbiornik jest podstawą, jak w przypadku prześwietłań sejsmicznych, budowy modelu prędkościowego podłoża. Model ten dopasowuje się następnie matematycznie tak, aby wyliczone opóźnienia dotarcia promieni odpowiadały możliwie dokładnie opóźnieniom obserwowanym w trakcie badań.

Technikę sejsmicznej tomografii refrakcyjnej zastosowano do określenia budowy geologicznej południowego zbocza doliny potoku Wilkówka. Ciek ten położony jest na południowych stokach Beskidu Małego, już na granicy z Kotliną Żywiecką. Potok zbiera wody mniejszych dopływów odwadniających od południa Grupę Magurki Wilkowickiej, płynąc na znacznym odcinku w płytkiej dolince przebiegającej w przybliżeniu równoległe do struktur geologicznych i biegu warstw oraz prostopadle do generalnego spadku zboczy Magurki Wilkowickiej. Podłoże skalne doliny zbudowane jest piaskowców gruboławicowych warstw istebniańskich, zapadających się pod kątem około 30° na południe [Nescieruk, Wójcik 1997]. Dolina potoku została przegrodzona zaporą ziemną, w celu utworzenia zbiornika retencyjnego wody pitnej zasilającej lokalny system wodociągowy. Potok Wilkówka tworzy nietypowy układ hydrogeologiczny. Z uwagi na przebieg doliny, skośny do generalnego nachylenia zbocza, a także układ i litologię warstw, wody potoku powinny być drenowane podziemnie w kierunku południowym, do Kotliny Żywieckiej. Tymczasem ciek nie jest drenowany, co więcej jest potencjalnym źródłem zasilania wodociągów.

Badania wykonano wzdłuż dwóch linii pomiarowych o długości około 100 i 150 m, w przybliżeniu prostopadłych do osi doliny potoku Wilkówka. Zastosowano rejestrację dla czterdziestu ośmiu kanałów (geofonów), rozmieszczonych w równych dwumetrowych

odstępach. Impuls sejsmiczny generowany był co 4 m wzdłuż całej długości linii pomiarowych. Do generacji fali sejsmicznej P wykorzystano uderzenie dziesięciokilowym młotem w płytę elastomerową leżącą na ziemi. Wygenerowane modele pola prędkości, zaprezentowane jako przekroje sejsmiczne (rys. 2), stały się podstawą interpretacji geologicznej. Na obu przekrojach zaobserwowano występowanie dwóch warstw prędkościowych. Warstwa płytsza, o prędkościach do 1 500-1 700 m/s, zbudowana jest ze zwietrzelin i osadów stokowych (deluwiiów). Ma nierówny spąg i miąższość od 5 do 15 m – na obu przekrojach miąższość ta wzrasta skokowo w przy zboczu doliny. Warstwa głębsza, stanowiąca masyw skalny zbudowany z przelawicających się piaskowców i łupków, charakteryzuje się wartościami prędkości w zakresie 2 000-3 000 m/s. Strome krawędzie strefy masywu skalnego i lokalne obniżenie prędkości występujące w SW częściach przekrojów zinterpretowano jako strome uskoki. Uzyskany obraz budowy geologicznej skazuje, że równoległe do południowego zbocza doliny Wilkówki przebiegają co najmniej dwa uskoki. Uskoki, w skutek wypełniających je drobnoziarnistych skał, mają często działanie uszczelniające [Yielding i in. 1997]. Zjawiska uszczelniania przez strefy uskokowe są dobrze znane z Karpat [np. Rybak-Ostrowska i in. 2019] i w opisanym przypadku są w dużej mierze odpowiedzialne za nietypowy układ hydrogeologiczny rejonu badań, ograniczając możliwość drenażu podziemnego na południe.

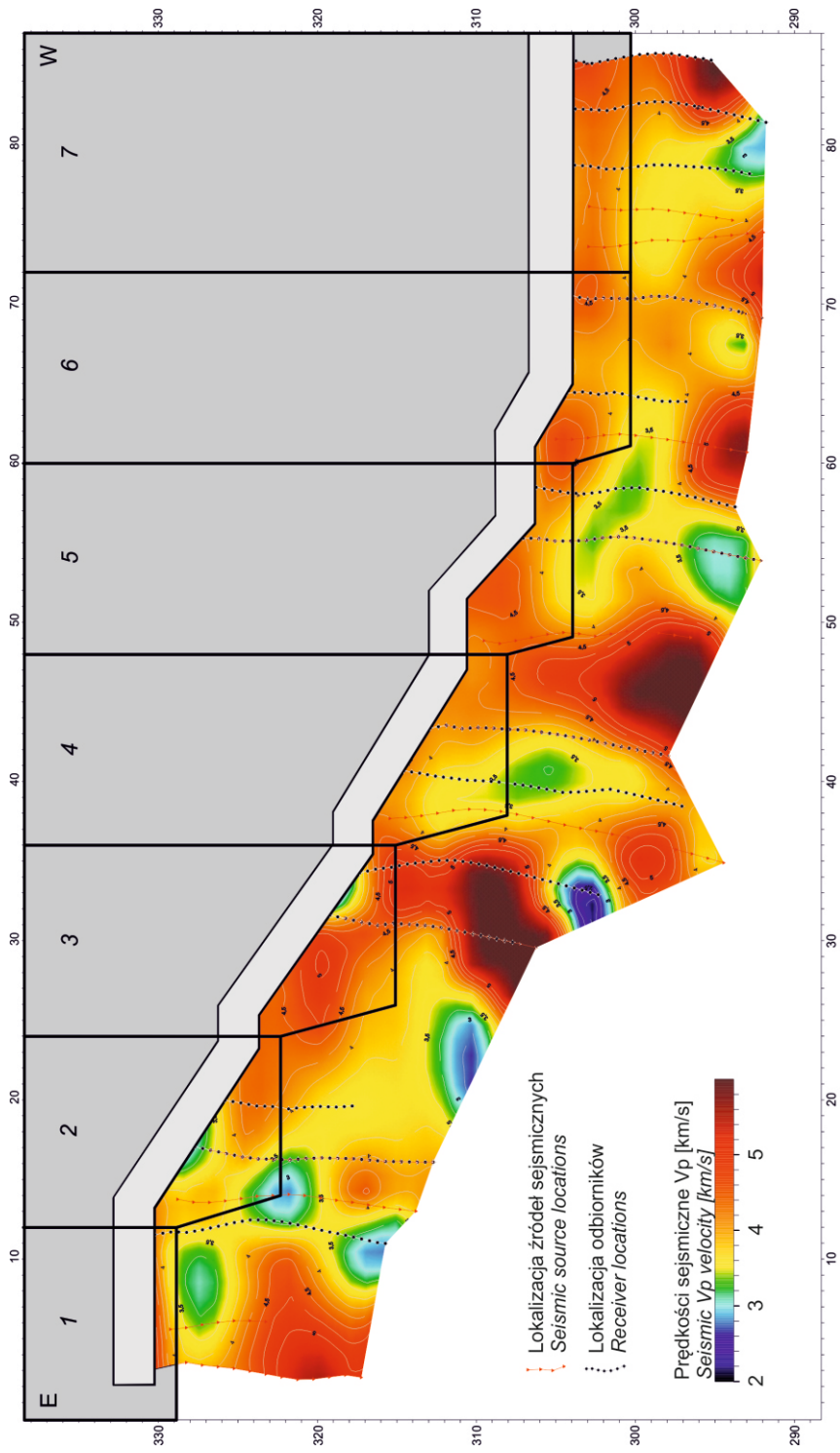
5. Badania techniką wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (MASW) i ich zastosowanie w rozpoznaniu wewnętrznej budowy korpusu zapory ziemnej

Badania technikami wykorzystującymi fale powierzchniowe wykonuje się, podobnie jak w przypadku badań refrakcyjnych, z powierzchni terenu. W tym celu stosuje się analizy spektralne i przestrzenne fal rozchodzących się po powierzchni ośrodka, tzw. drgań swobodnych powierzchni, służące do określenia rozkładu pola prędkości fal S w przypowierzchniowej warstwie podłoża [Foti i in. 2018]. Rozchodzenie się fal powierzchniowych na granicy ośrodków jest zjawiskiem złożonym. Ruch cząstek w ośrodku podłoża zachodzi nie tylko na samej powierzchni, ale angażuje również przypowierzchniowe warstwy, stopniowo zanikając wraz z głębokością. Teoretycznie ruch cząstek ośrodka zachodzi do głębokości $\frac{1}{2}$ długości fali powierzchniowej, a prędkość fali powierzchniowej zależy w zdecydowanej mierze od prędkości fali S w ośrodku. W przypadku warstwowanego ośrodka podłoża, jaki zwykle występuje w warunkach naturalnych, fale o różnej długości angażują ośrodek podłoża do różnej głębokości. Generując rozchodzenie się fal powierzchniowych o różnej długości i mierząc zależność pomiędzy prędkością fali a jej częstotliwością (tzw. dyspersja fal powierzchniowych), uzyskuje się informację o prędkości średniej dla różnych stref głębokościowych. Dalsze procedury przetwarzania pozwalają na uzyskanie profilu (lub przekroju) wartości prędkości rzeczywistych fal S dla danych warstw głębokościowych. Obecnie najpowszechniej

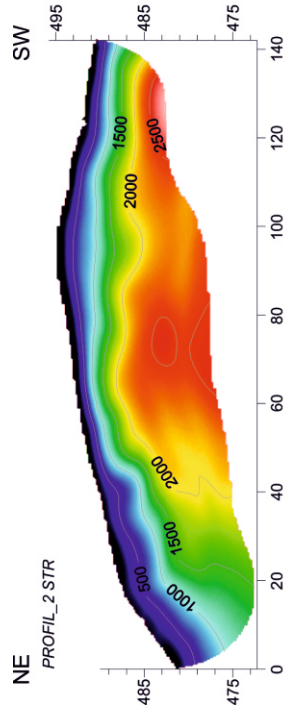
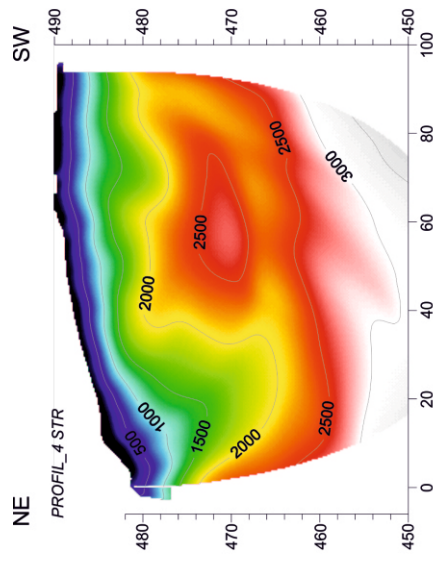
stosowaną techniką opartą na analizie fal powierzchniowych jest wielokanałowa analiza fal powierzchniowych (w skrócie znana jako akronim MASW od angielskiego *Multichannel Analysis of Surface Waves*). W technice tej generuje się możliwie szerokopasmowy sygnał sejsmiczny i rejestruje go układem kilkudziesięciu geofonów niskoczęstotliwościowych. Poprzez procedury odpowiedniej transformacji częstotliwościowych, można rozróżnić fale o różnej częstotliwości i ich prędkość rozchodzenia się dla kolejnych geofonów. Dalszy etap przetwarzania prowadzi do uzyskania pionowego profilu realnych prędkości fali S. Wykonując pomiar dla kolejnych punktów na powierzchni, można w rezultacie uzyskać przekrój prędkościowy wartości fali S.

Techniki MASW użyto jako techniki wiodącej, w celu określenia budowy wewnętrznej korpusu zapory ziemnej na potoku Wilkówka, której budowa nie została prawidłowo udokumentowana. Już na początku eksploatacji przesiąki i nietypowe wskazania piezometrów zaczęły budzić obawy o stabilność obiektu, co doprowadziło do decyzji o zrzuceniu wody. Badania geofizyczne miały dostarczyć informacji na temat konstrukcji zapory. Na korpusie wykonano pomiary techniką MASW wzdłuż dwóch linii pomiarowych. Jedna z nich przechodziła po koronie zapory, druga zlokalizowana była na skarpie odpowietrznej, w przybliżeniu w połowie wysokości konstrukcji. W obu przypadkach wykorzystano układ pomiarowy rejestrujący równocześnie sygnał sejsmiczny dla dwudziestu czterech geofonów. Zastosowano separację między geofonami równą jednego metra, a punkty strzałowe rozmieszczone były co dwa metry. Układ pomiarowy miał tzw. stałą geometrię, w której punkt strzałowy jest oddalony od poszczególnych geofonów o stałą wartość, a cały układ jest przemieszczany stopniowo wzdłuż linii pomiarowej. W efekcie badań uzyskano dwuwymiarowe przekroje wartości prędkości fali S. Na rysunku 3 przedstawiono przekrój wykonany wzdłuż korony zapory. Kluczowym dla rozpoznania konstrukcji zapory jest warstwa o obniżonej wartości prędkości fali S, występująca w spągowej części korpusu zapory.

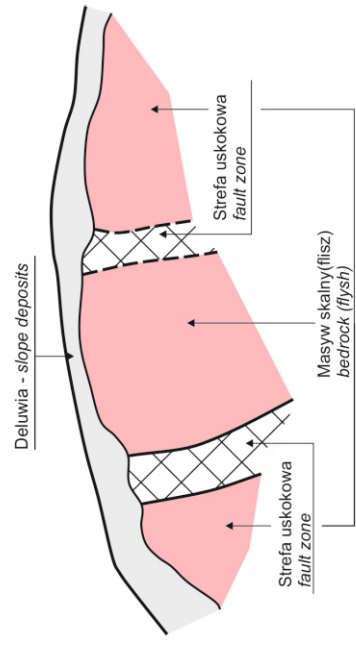
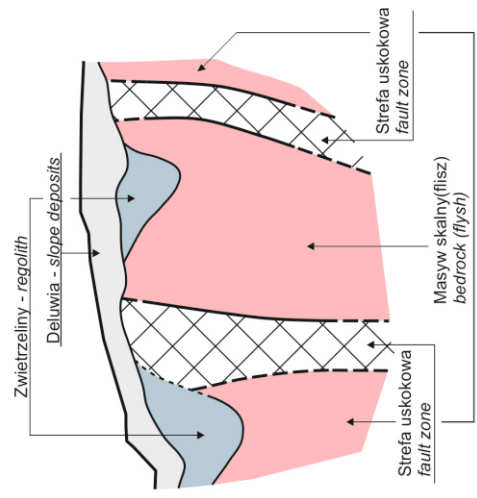
Warstwa ta ku północy rozszerza się i płynnie przechodzi w warstwę niskoprędkościową, interpretowaną jako osady aluwiiów tarasu rzecznego. W korpusie wyższe warstwy odpowiadają kolejnym warstwom o zróżnicowanym zagęszczeniu. Na profilu wykonanym na skarpie odpowietrznej układ odpowiadający opisanemu nie powtórzył się. Wyniki badań zinterpretowano tak, że warstwa obniżonych prędkości odpowiada wałowi uformowanemu z aluwiiów, a następnie przysypanemu kolejnymi warstwami, zbudowanymi z materiału już dowiezionego. W ten sposób wewnątrz korpusu zapory uformowano rdzeń z przepuszczalnych osadów piaszczystych i żwirowych (aluwiiów), który pozostaje w łączności hydraulicznej z osadami tarasu, i uszczelniono go po wierzchu powłoką kolejnych warstw, już słabiej przepuszczalnych. Łączność hydrauliczna z gruntami rodzimymi pokrywającymi zbocza doliny powoduje, że ciśnienie w przepuszczalnym rdzeniu jest podwyższone. Wnioski oparte na wynikach badań MASW potwierdziły się również w innych badaniach geofizycznych.



Rys. 1. Pole prędkości fali P w części dolnej korpusu i podłożu zapory betonowej



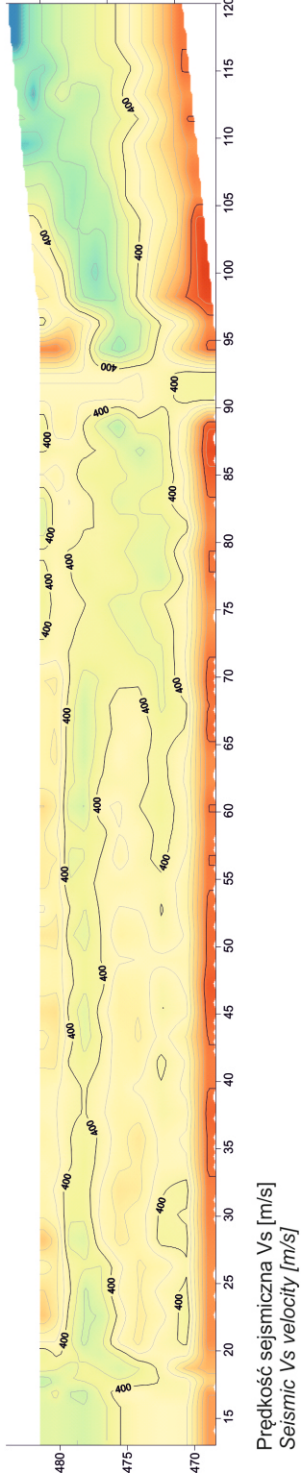
Prędkości sejsmiczne Vp [m/s]
 Seismic Vp velocity [m/s]



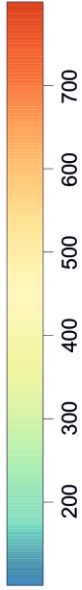
Rys. 2. Przekroje prędkościowe wzdłuż dwóch równoległych linii pomiarowych (góra) i ich interpretacja geologiczna (dół)

S

N



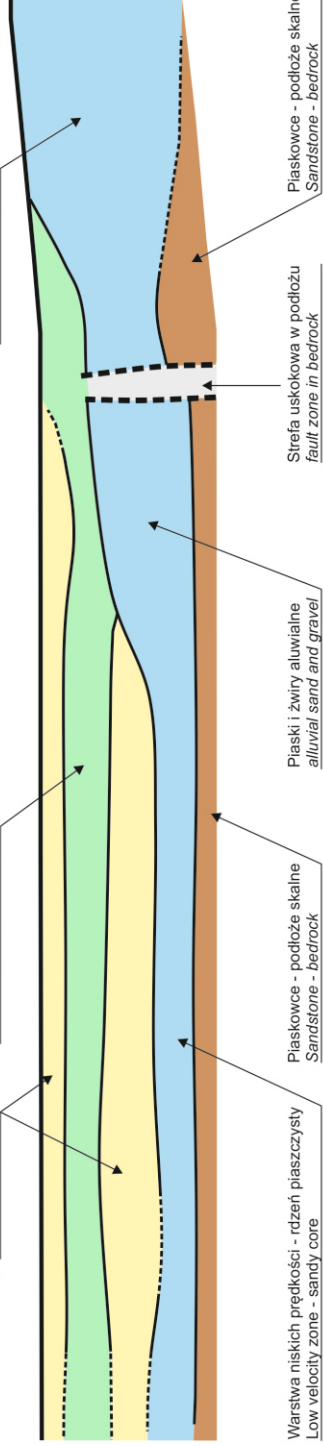
Prędkość sejsmiczna V_s [m/s]
Seismic V_s velocity [m/s]



Nasyp mocno zagęszczony
highly compacted layer

Nasyp przeciętnie zagęszczony
moderately compacted layer

Piaski i żwiry aluwialne
alluvial sand and gravel



Warstwa niskich prędkości - rdzeń piaszczysty
Low velocity zone - sandy core

Piaskowce - podłoże skalne
Sandstone - bedrock

Piaski i żwiry aluwialne
alluvial sand and gravel

Srebra uskoka w podłożu
fault zone in bedrock

Piaskowce - podłoże skalne
Sandstone - bedrock

Rys. 3. Przekrój sejsmiczny wartości prędkości fali S (górną) wzdłuż korony zapory ziemnej, wraz z interpretacją budowy wewnętrznej (dół)

6. Podsumowanie

Zaprezentowane przykłady zastosowania różnych technik badań sejsmicznych pozwalają stwierdzić, że badania tego typu mogą być użytecznym narzędziem dla oceny stanu technicznego zapór zarówno ziemnych, jak i betonowych. Techniki badań sejsmicznych, jak i innych badań wywodzących się z geofizyki inżynierskiej, są również szczególnie przydatne do rozpoznawania szczegółów budowy geologicznej podłoża, zwłaszcza w skalach, w których tradycyjne techniki oparte na wierceniach zawodzą ze względu na ich punktowe, ograniczone stosowanie. Należy jednak podkreślić, że korelacja wyników badań sejsmicznych z wynikami wierceń (ewentualnie sondowań mechanicznych) jest kluczowym elementem prawidłowego rozpoznania podłoża.

Szczególną rolą osób zajmujących się kontrolą stanu technicznego zapór jest jasne i prawidłowe sformułowanie zagadnienia badawczego, które stawiane jest przed geofizykami. Zrozumienie zalet, ale i ograniczeń metod badawczych, jest konieczne dla prawidłowej współpracy przy diagnozie stanu technicznego zapór.

Literatura

- Angioni T., Rechten R.D., Cardimona S.J., Luna R., 2003, Crosshole seismic tomography and borehole logging for engineering site characterization in Sikeston, MO, USA, *Tectonophysics*, 368 (1-4), 119-137, DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00154-9
- Bestyński Z., Thiel K., 1999, Flysh geotechnical properties by the Geophysical Classification Index KFG, [w:] *Proceedings of the 9th International Congress on Rock Mechanics*, Tom 2, P. Berest, G. Vouille (red.), AA Balkema Publishers, Rotterdam, 1339-1343
- Foti S., Hollander F., Garofalo F., Albarello D., Asten M., Bard P., Comina C., Cornou C., Cox B., Di Giulio G., Forbriger T., Hayashi K., Lunedei E., Martin A., Marcerat D., Ohrnberger M., Poggi V., Renalier F., Sicilia D., Socco V., 2018, Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (6), 2367-2420, DOI: 10.1007/s10518-017-0206-7
- Huang A.-B., Lee J.-T., Ho Y.-T., Chiu Y.-F., Cheng S.-Y., 2012, Stability monitoring of rainfall - induced deep landslides through pore pressure profile measurements, *Soils and Foundations*, 52 (4), 737-747, DOI: 10.1016/j.sandf.2012.07.013
- Nescieruk P., Wójcik A., 1997, Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50000, arkusz 1012 Bielsko-Biała, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Ostrowski S., Rybak-Ostrowska B., Lasocki M., 2016, Fault zone imaging with seismic refraction tomography, [w:] *Proceedings of the Near Surface Geoscience 2016 – 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysisc*, DOI: 10.3997/2214-4609.201601958

- Rybak-Ostrowska B., Gąsiński A., Kaproń G., 2019, Dawsonite as an indicator of multistage deformation and fluid pathways within fault zones: Insights from Fore-Dukla Trust Sheet, Outer Carpathians, Poland, *Acta Geologica Polonica*, (w druku)
- Sheehan J.R., Doll W.E., Mandell W.A., 2005, An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10 (1), 21-34, DOI: 10.2113/JEEG10.1.21
- Uhlemann S., Hagedorn S., Dashwood B., Maurer H., Gunn D., Dijkstra T., Chambers J., 2016, Landslide characterization using P- and S-wave seismic refraction tomography – The importance of elastic moduli, *Journal of Applied Geophysics*, 134, 64-76, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.08.014
- Wdowiarz S., Zubrzycka A., Fryszak-Wołkowska A., 1988, Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz 1040 Rymanów, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- Yielding G., Freeman B., Needham D.T., 1997, Quantitative fault seal prediction, *AAPG Bulletin*, 81 (6), 897-917
- Yilmaz O., 2015, Engineering seismology with applications to geotechnical engineering, *Investigations in Geophysics Series*, 17, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 954 s.