

Elektrownia Szczytowo-Pompowa Porąbka-Żar Badania geofizyczne dla oceny warunków posadowienia oraz pomiary geodezyjne w eksploatacyjnej ocenie stanu technicznego

Zbigniew Bestyński¹, Grzegorz Pacanowski², Tomasz Ryfa¹, Dagmara Zelaya Wziątek¹



Z. Bestyński



G. Pacanowski



T. Ryfa



D. Zelaya
Wziątek

Porąbka-Żar Pumped Storage Power Plant. Geophysical research to assess the foundation conditions and geodetic measurements in the operational assessment of the technical condition. Pr. Geol., 72: 772–780: doi:10.7306/2024.66

A b s t r a c t. The article presents an outline of the Pumped Storage Power Plant (PSPP) Porąbka-Żar construction and the geological structure of the area of its location as well as the results of comprehensive geophysical, seismic and geoelectric research used to identify the conditions of its foundation. Different methodologies, techniques of geophysical research as well as the measurement equipment used 55 years ago were presented. The methodology and technique as well as the results of currently performed periodic control tests of the deformation of the main basin and the embankments of the upper reservoir, performed using the laser scanning method to assess its technical condition, were also presented.

measurement equipment used 55 years ago were presented. The methodology and technique as well as the results of currently performed periodic control tests of the deformation of the main basin and the embankments of the upper reservoir, performed using the laser scanning method to assess its technical condition, were also presented.

Keywords: seismic wave velocity, electrical resistivity, elastic modulus, tectonic zone, slip surface, laser scanning.

Pomysł budowy elektrowni szczytowo-pompowej zrodził się już przed II wojną światową, w czasie budowy zapory Porąbka na Sole. Nawiązano przy tym do idei przedstawionej przez prof. Gabriela Narutowicza, który jednak nie wskazał dokładnej lokalizacji obiektu. Miała to być elektrownia o mocy 200 MW. Po wojnie pomysł podjął Kazimierz Dachowski, który w 1952 r. w szerszej koncepcji *Elektrownie Wodne Pompowe; Żydowo, Porąbka-Żar, Włocławek, Łapino* wysunął m.in. propozycją budowy Elektrowni Szczytowo-Pompowej Porąbka-Żar (ESP Porąbka-Żar). W opracowanym przez *Energoprojekt Warszawa* studium lokalizacyjnym za najkorzystniejszy z rozważanych wariantów uznano lokalizację elektrowni w komorze podziemnej w masywie góry Żar, a zbiornika górnego na jej szczycie (Bienkiewicz, Biliński, 1999).

W latach 1964–1968 opracowano założenia techniczno-ekonomiczne, na podstawie których w czerwcu 1968 r. została podjęta uchwała rządowa o budowie elektrowni szczytowo-pompowej o nazwie *Porąbka-Żar*. W tym samym roku rozpoczęto również badania geofizyczne i geologiczne warunków jej posadowienia. W ramach projektu wstępnego opracowano pięć wariantów różniących się usytuowaniem komory elektrowni i przebiegu sztolni doprowadzających wodę. Ostateczny układ technologiczny elektrowni ustalono w 1971 r. w nawiązaniu do doświadczeń i pomiarów przy drażeniu w masywie sztolni zwiadowczej. Schemat konstrukcji ESR *Porąbka-Żar* przedstawiono na rycinie 1.

W 1969 r. rozpoczęto prace górnicze, drażenie sztolni zwiadowczej (5) w kierunku komory elektrowni i chodnika poprzecznego do derywacji (9), z którego, od dołu, rozpoczęto drażenie sztolni ciśnieniowych (2). Poprzecznie do sztolni zwiadowczej wydrążono również dwa chodniki wezłowiowe, północno-wschodni i południowo-zachodni, w rejonie północno-wschodniej i południowo-zachodniej ściany projektowanej komory elektrowni, od których rozpoczęto jej drażenie.

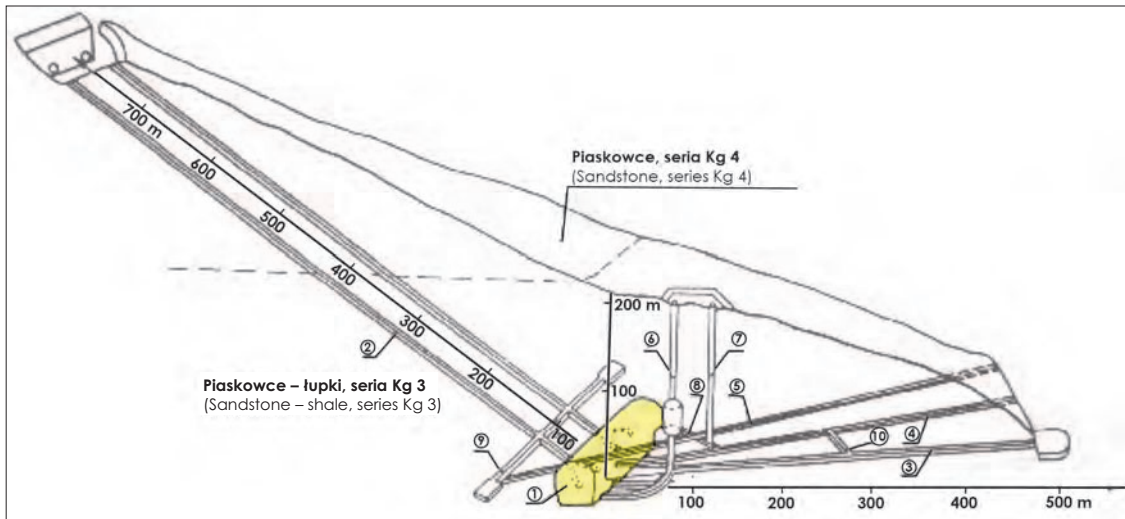
Komora elektrowni (1), wydrążona w piaskowcowo-łupkowym masywie fliszowym, ma długość 125 m, wysokość 40 m i szerokość 27 m. Ostateczną obudowę komory stanowi zbrojony beton o grubości ok. 1–3 m. Komora jest podzielona na trzy poziomy: górny – elektryczny z nastawnią i rozdzielnią mocy, środkowy – montażowy, i dolny z czterema hydrozespołami odwracalnymi i transformatorami blokowymi.

Dwie sztolnie ciśnieniowe, o nachyleniu 36° i długości 872 m każda, zostały opancerzone od wewnątrz płaszczem stalowym o grubości od 16 mm w górnej do 52 mm w dolnej części. Średnica sztolni zmniejsza się od 4,33 m przy wlotach do 3,30 m przy wylotach do komory. Odległość między sztolniami zmienia się od 20 m przy wlotach do 50 m przy wylotach do komory elektrowni.

Za komorą elektrowni jest usytuowana sztolnia odpływowa (3) i komora uderzeń (6). Wychodzące z komory sztolnie turbinowe łączą się w sztolnię odpływową o średnicy 6 m i długości 500 m. Za zbiegiem sztolni turbino-

¹ Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Technicznej Kontroli Zapór w Katowicach, ul. Kossutha 6, 40-844 Katowice; bestyński.z@imgw.pl, tomasz.ryfa@imgw.pl, dagmara.wziątek@imgw.pl; ORCID ID: Z. Bestyński – 0000-0002-1565-4459, T. Ryfa – 0009-0003-6174-0723, D.Z. Wziątek – 0000-0002-6334-1465.

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; gpac@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0001-9045-3262.



Ryc. 1. Schemat konstrukcji elektrowni szczytowo-pompowej Porąbka-Żar (Łanocha, 1993). 1 – komora elektrowni; 2 – sztolnie ciśnieniowe; 3 – sztolnia odpływowa; 4 – sztolnia komunikacyjna; 5 – sztolnia zwiadowcza i kablowa; 6 – komora uderzeń i szyb odpowietrzający; 7 – szyb wentylacyjny; 8 – tunel wentylacyjny; 9 – przecinka do sztolni ciśnieniowych; 10 – przecinka do sztolni odpływowej

Fig. 1. Construction diagram of the Porąbka-Żar pumped storage power plant (Łanocha, 1993). 1 – electro-station cavern; 2 – upper pressure tunnels; 3 – outlet tunnel; 4 – service tunnel; 5 – investigation drift and cable duct; 6 – water hammer chamber and deaeration shaft; 7 – ventilation shaft; 8 – ventilation tunnel; 9 – cross-cut to the upper pressure tunnels; 10 – cross-cut to the outlet tunnel

wych, na początku sztolni odpływowej, jest usytuowana komora uderzeń połączona z powierzchnią terenu. Jej zadaniem jest tłumienie uderzeń wody w czasie odstawiania hydrozespołów, szczególnie awaryjnego. Komora w kształcie walca o średnicy 14 m i wysokości 38 m jest połączona z derywacją odprowadzającą szybem o średnicy 4,5 m. Od stropu komory uderzeń łączy z powierzchnią terenu szyb zakończony budynkiem nadszybia. Komora ma obudowę żelbetową o grubości 1 m.

Zbiornik górny ma kształt zbliżony do elipsy, której osie mają długości 250 i 650 m. Pojemność zbiornika wynosi 2,3 mln m³, w tym pojemność użytkowa to 2,0 mln m³. Przy głębokość zbiornika 22 m, poziom wody w czasie jednego pełnego cyklu pracy zmienia się w zakresie 20 m, od 739,0 do 759,0 m n.p.m. Powierzchnia zbiornika w koronie wynosi 14 ha, a jego rzędna 761 m n.p.m. Maksymalna wysokość obwałowań ziemnych dochodzi do 50–60 m, a ich szerokość w koronie do 5 m. Pierwotnie projektowano wykonanie betonowych ścian zbiornika górnego. Stwierdzona badaniami geofizycznymi i potwierdzona wierceniami strefa brekcji tektonicznej w rejonie południowej ściany zbiornika spowodowała zmianę konstrukcji na nasyp ziemny.

Zbiornik dolny stanowi Jezioro Międzybrodzkie. Sztolnia odpływowa jest zakończona dolnym ujęciem z podwójnymi wlotami z zamknięciami roboczymi i zastawkami remontowymi. Przy ujęciu zlokalizowano tzw. nieckę wypadową. Stanowi ją betonowe zagłębienie mające chronić dno zbiornika przed erozją.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Masyw skalny, w obrębie którego jest usytuowana ESP Porąbka-Żar, jest położony na obszarze Beskidu Małego (Nescieruk, Wójcik, 1997). Masyw jest zbudowany z fliaszowych warstw godulskich serii Kg3 i Kg4 płaszczowiny śląskiej. Warstwy serii Kg3, wykształcone jako pakiety łupkowo-piaskowcowe, o zawartości piaskowców w prze-

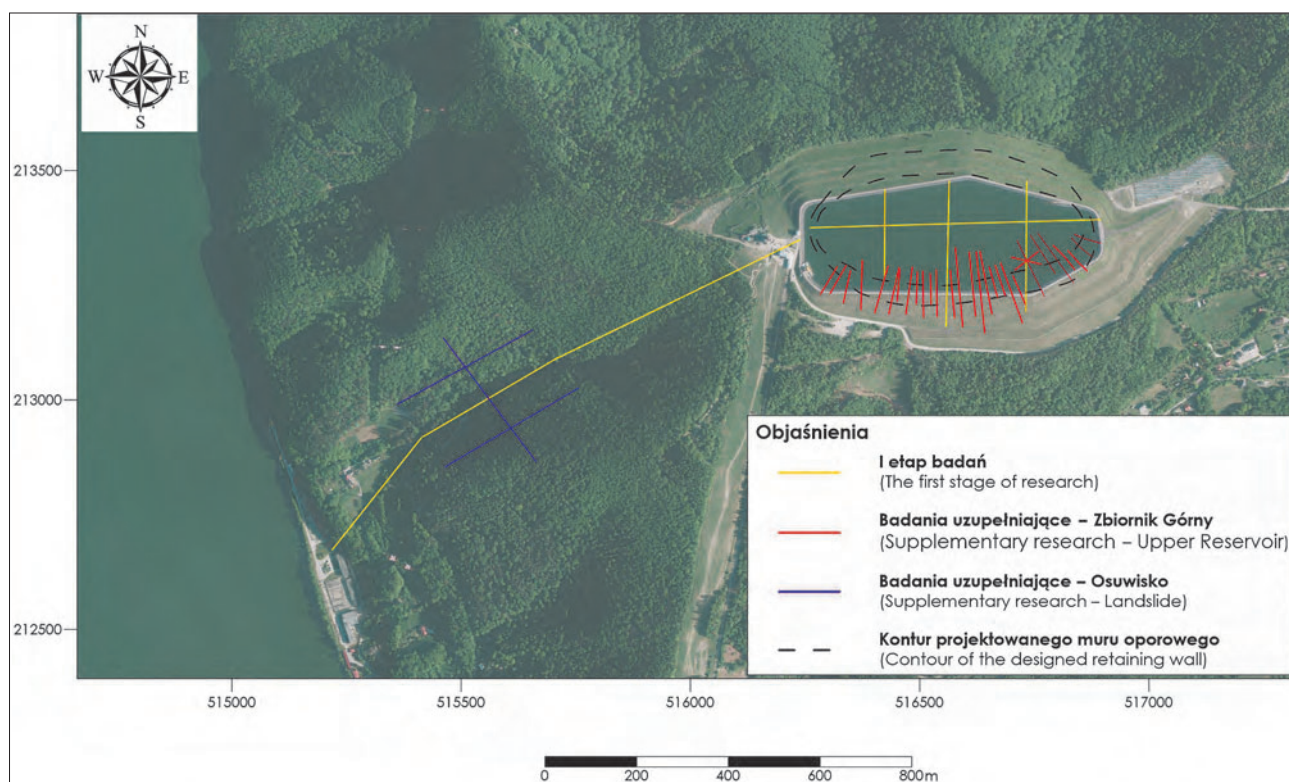
dziale 40–55% i upadzie 8–10° na SE, charakteryzują się przeciętnym stopniem zaangażowania tektonicznego. Warstwy te występują w rejonie lokalizacji komory elektrowni, sztolni odpływowej, komunikacyjnej i zwiadowczej (kablowej) oraz dolnych odcinków sztolni ciśnieniowych.

Leżące na nich warstwy serii Kg4, stanowiące podłoże zbiornika górnego, są wykształcone w formie pakietów piaskowcowych i piaskowcowo-lupkowych o zawartości piaskowców w przedziale 50–90%. Miąższość warstw piaskowców w tym rejonie wynosi 15–223 cm, a przewarstwień łupkowych 1–5 cm. Warstwy zapadają na południe pod kątem kilku do kilkunastu stopni i charakteryzują się wysokim stopniem zaangażowania tektonicznego. Masyw jest pocięty systemem uskoków o niewielkim zrzucie (0,5–0,9 m) i rozciągłości W–E, zbliżonej do osi zbiornika, zapadających pod kątem 60–70° na północ. W rejonie południowej ściany zbiornika stwierdzono rozległą strefę brekcji tektonicznej o szerokości kilkudziesięciu metrów i przebiegu W–E.

Miąższość czwartorzędowej zwietrzliny złożonej z glin i rumoszków skalnych, zalegającej na skalnym podłożu, wynosi od kilku do powyżej 10 m wzdłuż trasy derywacji i ok. 10 m na szczycie góry Żar. Jedynie w rejonie wspomnianej strefy brekcji tektonicznej miąższość zwietrzliny dochodzi do 28 m.

BADANIA GEOFIZYCZNE

ESP Porąbka-Żar była pierwszym obiektem hydrotechnicznym, dla którego już na etapie Założeń Techniczno-Ekonomicznych (ZTE), równoległe z badaniami geologicznymi, wykonano kompleksowe badania geofizyczne. Do wykonywania takich badań Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych powołało specjalistyczną jednostkę – Zespół Geofizyki Inżynierskiej – wykonującą kompleksowe, specjalistyczne badania geofizyczne metodami sejsmiczną i geoelektryczną, dla określenia warunków posadowienia obiektów inżynierskich (Dziewiański i in., 1983). Na obiek-



Ryc. 2. Lokalizacja powierzchniowych badań geofizycznych
Fig. 2. Location of surface geophysical investigations

cie *Porąbka-Żar* pomiary sejsmiczne wykonano 24-kanalową aparaturą sejsmiczną SS-24P produkcji ZSRR. Aparaturę z zapisem analogowym na papierze światłoczułym dostosowano do badań inżynierskich poprzez zwiększenie gęstości linii czasowania do 2 ms i prędkości przesuwu papieru do 1,5 m/s. Zwiększono również zakres rejestrowanych częstotliwości, dobudowując pasmo filtracji 100–270 Hz. Aparatura ze względu na wagę i rozmiary oraz konieczności dysponowania w terenie podręczną ciemnią fotograficzną, do wywoływania seismogramów, musiała być zabudowana na średniej wielkości samochodzie ciężarowym. Fale sejsmiczne wzbudzano udarowo, młotem ręcznym o ciężarze 10 kg, a rejestrowano geofonami produkcji PPG typu: GF-9V o polaryzacji pionowej (pomiary powierzchniowe fal podłużnych) i GF-9H o polaryzacji poziomej (pomiary powierzchniowe fal poprzecznych i pomiary fal podłużnych i poprzecznych w ociosach wyrobisk).

Pomiary geoelektryczne wykonano połowym kompensatorem elektronowym PKE-3 produkcji PPG, z ręczną kompensacją potencjału polaryzacji elektrod pomiarowych. Pomiary napięcia w obwodzie pomiarowym i natężenia o obwodzie zasilającym były wykonywane oddzielnie. Zasilanie stanowiły suche baterie o napięciu od kilkudziesięciu do kilkuset woltów i natężeniu kilku amperów. Uziemieniem obwodu pomiarowego były elektrody miedziane, a obwodu zasilającego elektrody stalowe.

Wykonanie wiarygodnych pomiarów terenowych zarówno sejsmicznych, jak i elektrooporowych, opisanym sprzętem pomiarowym, wymagało od operatorów dużych umiejętności i doświadczenia.

BADANIA POWIERZCHNIOWE

W pierwszym etapie badań, w latach 1968–1969 wykonano powierzchniowe badania sejsmiczne i geoelektryczne

(Trojan, 1971). W 1968 r. przeprowadzono pomiary wzdłuż trasy derywacji i na terenie zbiornika górnego, projektowanego na szczycie góry Żar. W 1969 r. wykonano pomiary uzupełniające dla udokładnienia położenia strefy tektonicznej stwierdzonej badaniami z 1968 r. na południowym zboczu góry Żar oraz na trasie derywacji – w rejonie osuwiska zlokalizowanego na zachodnim jej zboczu – w celu określenia jego geometrii. Lokalizację badań powierzchniowych na trasie derywacji, osuwiska i zbiornika górnego przedstawiono na rycinie 2.

Pomiary sejsmiczne wzdłuż trasy derywacji wykonano metodą ciągłego profilowania refrakcyjnego z podwójnym pokryciem, rozstawami pomiarowymi o długości 66 m, wzdłuż trzech odcinków pomiarowych o długości 330–360 m. Zastosowana metodyka pomiarowa umożliwiła określenie głębokości i przebiegu stropu skalnego podłoża oraz określenie prędkości fal sejsmicznych podłużnych V_p w jego obrębie, do głębokości kilkunastu metrów. Prędkość sejsmicznych fal refrakcyjnych, określona w stopnie litego skalnego podłoża wzdłuż trasy derywacji, wynosiła 2300–3400 m/s, a miąższość czwartorzędowego nadkładu 5–9 m. Jedynie w rejonie osuwiska, w środkowej części tej trasy, miąższość nadkładu (koluwiów) przekraczała 10 m. Stopień zaangażowania tektonicznego skalnego podłoża na trasie derywacji można określić na podstawie prędkości fal sejsmicznych jako przeciętny do dużego.

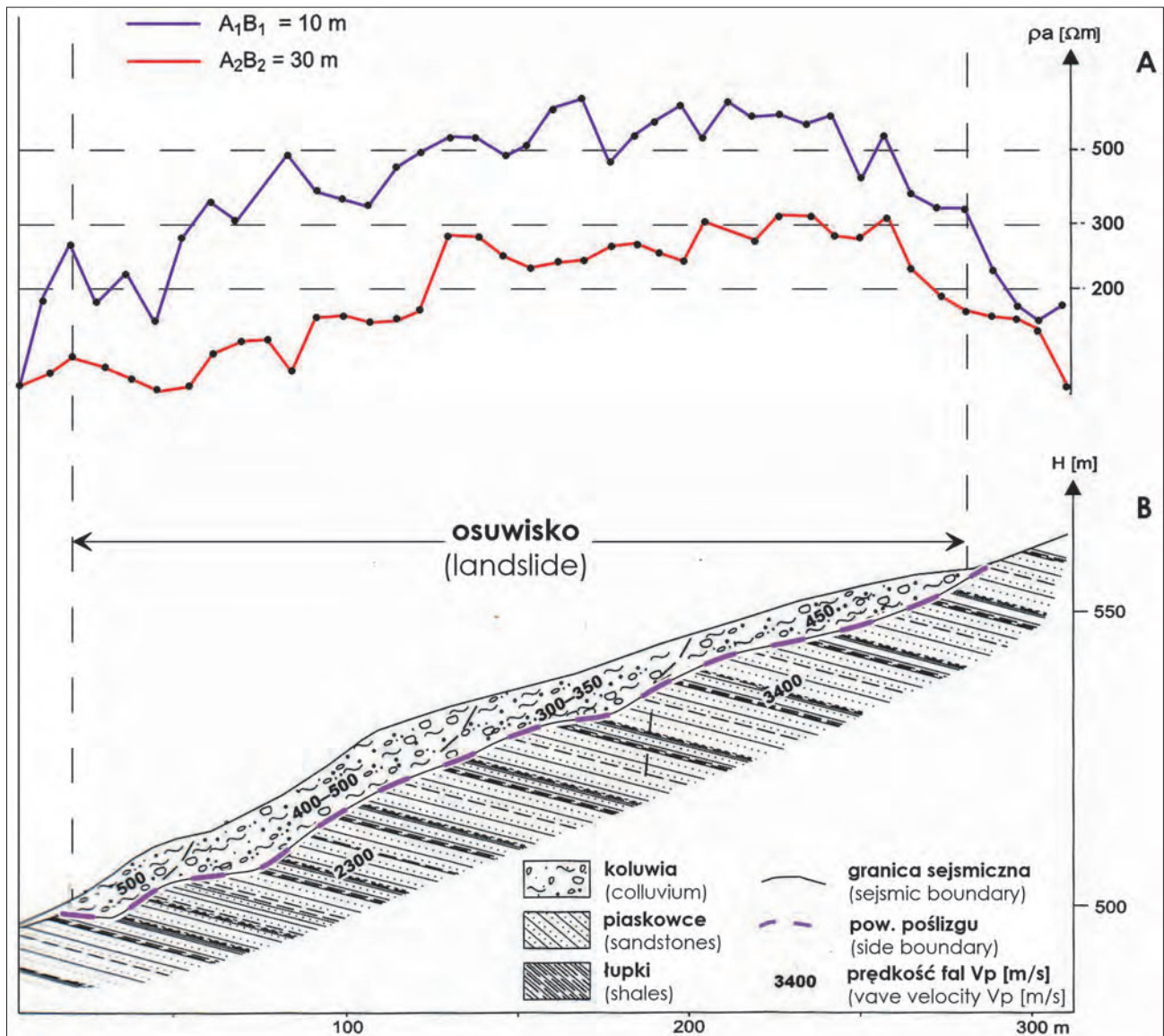
Pomiary geoelektryczne wzdłuż tych samych linii pomiarowych wykonano metodą dwupoziomowego profilowania elektrooporowego rozstawami o długości linii prądowych $AB = 10$ m i $AB = 30$ m. Pomiary krótszym rozstawem dotyczą przypowierzchniowej warstwy glin z rumoszem skalnym, o miąższości do ok. 2–3 m, a rozstawem głębszym stropu zwietrzałego i spękanego fliszu do głębokości ok. 6–7 m. Oporność elektryczna glin z rumoszem zawierała się w przedziale 90–200 Ω m, a spękanego i zwietrzałego

fliszu wynosiła 60–120 Ωm . Wyżej wymienione warstwy stanowią koluwia osuwiskowe, ich oporność jest wyższa i wynosi odpowiednio: 200–600 Ωm i 80–200 Ωm . Zsuw materiału skalnego powoduje wzrost porowatości i odwodnienie, czego efektem jest stwierdzony wzrost oporności.

W rejonie osuwiska, w celu określenia jego geometrii, wykonano pomiary uzupełniające, sejsmiczne i geoelektryczne, wzdłuż trzech linii pomiarowych, dwóch równoległych do osi zsuwu i jednej poprzecznej. Poziomy zasięg osuwiska określono na podstawie zwiększonej oporności koluwiów w stosunku do nienaruszonego nadkładu, a powierzchnię poślizgu identyfikowano z horyzontem refrakcyjnym wyznaczającym granicę nadkładu (koluwiów) ze skalnym podłożem, co zostało potwierdzone szybikiem. Opisane badania (Bestyński, Trojan, 1975) były pierwszym, na terenie Karpat fliszowych, wykorzystaniem pomiarów sejsmicznych i geoelektrycznych do określenia geometrii osuwiska. Rezultaty badań sejsmicznych i geoelektrycznych na profilu w osi osuwiska przedstawiono na rycinie 3.

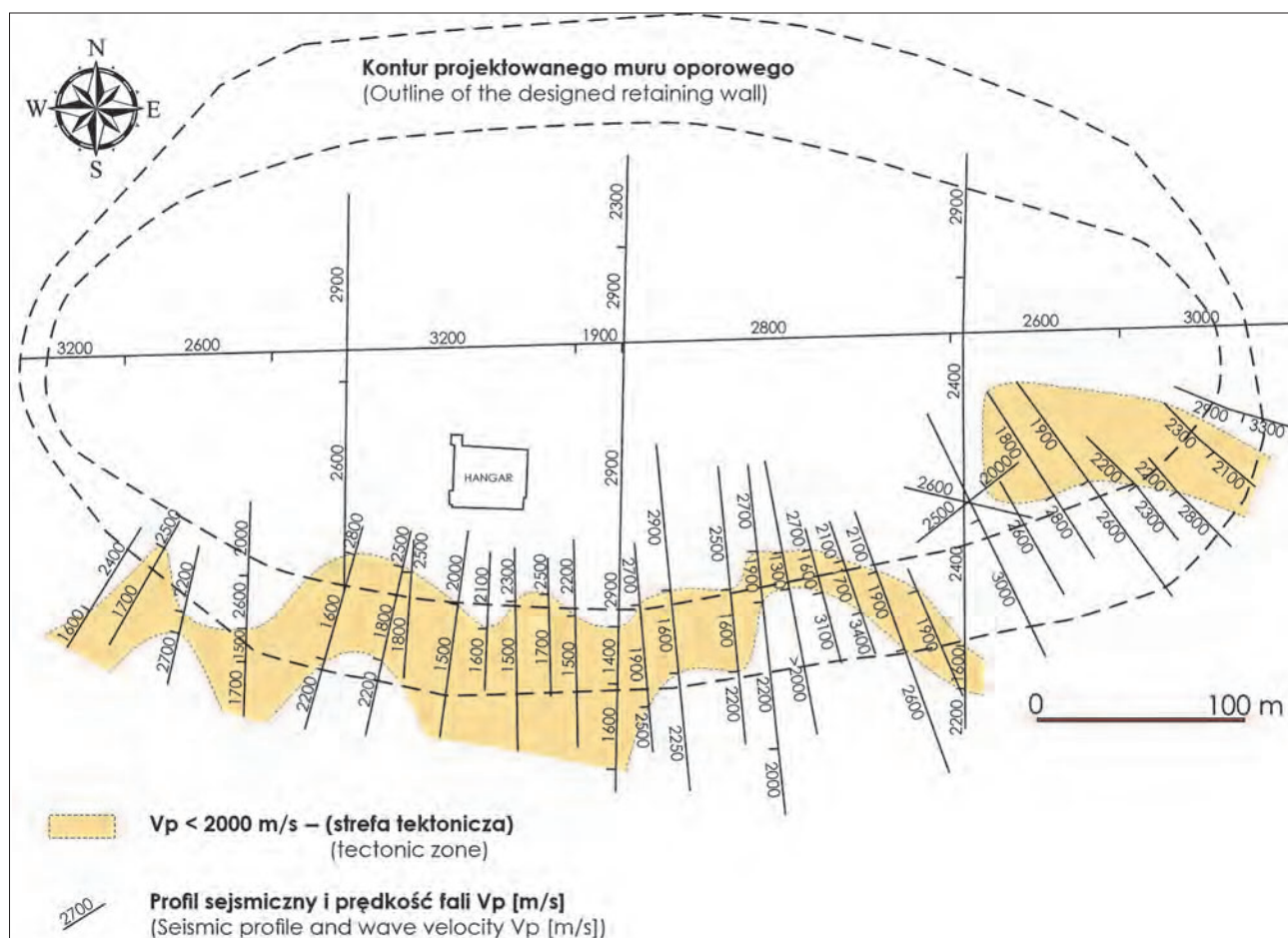
Pomiary sejsmiczne na terenie zbiornika górnego wykonano metodyką identyczną z zastosowaną na trasie derywacji. W pierwszym etapie badań pomiary przeprowadzono

wzdłuż czterech linii pomiarowych, jednej o długości 660 m, wzdłuż dłuższej osi projektowanego zbiornika, i trzech poprzecznych o długości 200–300 m. Podłoże skalne charakteryzuje się prędkościami fal podłużnych V_p w zakresie 1600–3200 m/s i zalega od głębokości ok. 6 do –10 m p.p.t. Bardzo niskie prędkości fal, $V_p = 1600$ m/s, stwierdzone w południowej części zbocza wskazują na bardzo silne zaburzenia tektoniczne skalnego podłoża – brekcję tektoniczną. Ponieważ rejon ten stanowi podłoże południowej ściany zbiornika górnego, to zrobiono także badania uzupełniające, w celu dokładnego określenia przebiegu wspomnianej strefy niskich prędkości fal. Wykonano 29 profili poprzecznych do podłużnej osi zbiornika, którymi okonturowano jej przebieg, oraz dodatkowy profil sejsmiczny wzdłuż tej strefy, rozstawami pomiarowymi o długości 110 m, zapewniającymi zasięg głębokościowy pomiarów do kilkudziesięciu metrów. Określono w ten sposób granicę refrakcyjną o prędkościach fal $V_p = 2400$ –2800 m/s, przebiegającą na głębokości 25–30 m. Rezultaty pomiarów na terenie zbiornika górnego z położeniem wspomnianej strefy niskich prędkości fal V_p przedstawiono na rycinie 4.



Ryc. 3. Rezultaty badań w rejonie osuwiska: geoelektrycznych (A), sejsmicznych (B) (Bestyński, Trojan, 1975)

Fig. 3. Results of research in the landslide area: geoelectric (A), seismic (B) (Bestyński, Trojan, 1975)



Ryc. 4. Rezultaty badań w rejonie zbiornika górnego
Fig. 4. Results of research in the area of the upper reservoir

Efektom tych badań była zmiana konstrukcji ścian zbiornika, planowanych w jednym z wariantów jako pionowe ściany żelbetowe, na rzecz obwałowań ziemnych. Pomimo tego w trakcie wznoszenia obwałowania południowego zaobserwowano spękania świadczące o utracie stateczności podłoża, co spowodowało konieczność wymiany 300 000 m³ materiału skalnego podłoża na materiał pobrany z pobliskiego kamieniołomu.

BADANIA W WYROBISKACH PODZIEMNYCH

Badania geofizyczne w wyrobiskach podziemnych wykonywano od 1969 do 1974 r., w miarę postępu ich drążenia (Bestyński, 1973, 1975). Pomiary rozpoczęto w 1969 r. od sztolni zwiadowczej i chodnika poprzecznego do derywacji. Pomiary w sztolni zwiadowczej, o długości 600 m, wykonano metodą profilowania refrakcyjnego z podwójnym pokryciem rozstawem o długości 44 m, a w chodniku poprzecznym do derywacji, o długości 100 m, rozstawem o długości 33 m. Obudowę tych wyrobisk stanowiły stalowe łuki podatne (obudowa ŁP) rozmieszczone co ok. 1 m b., a przestrzeń między łukami była podparta żelbetowymi blokami opartymi na łukach ŁP obudowy. Profile pomiarowe były usytuowane w spągu wyrobisk, wzdłuż ociosu. Prędkość fal sejsmicznych Vp w sztolni zwiadowczej, do ok. 550 m, wynosiła od 3100 do 3500 m/s, a od 550 do 600 m zmniejszała się do 3000 m/s. W chodniku poprzecznym do

derywacji, na całej jego długości, prędkość fal wynosiła Vp = 2500 m/s. Spadek prędkości wskazuje na zwiększony stopień zaangażowania tektonicznego.

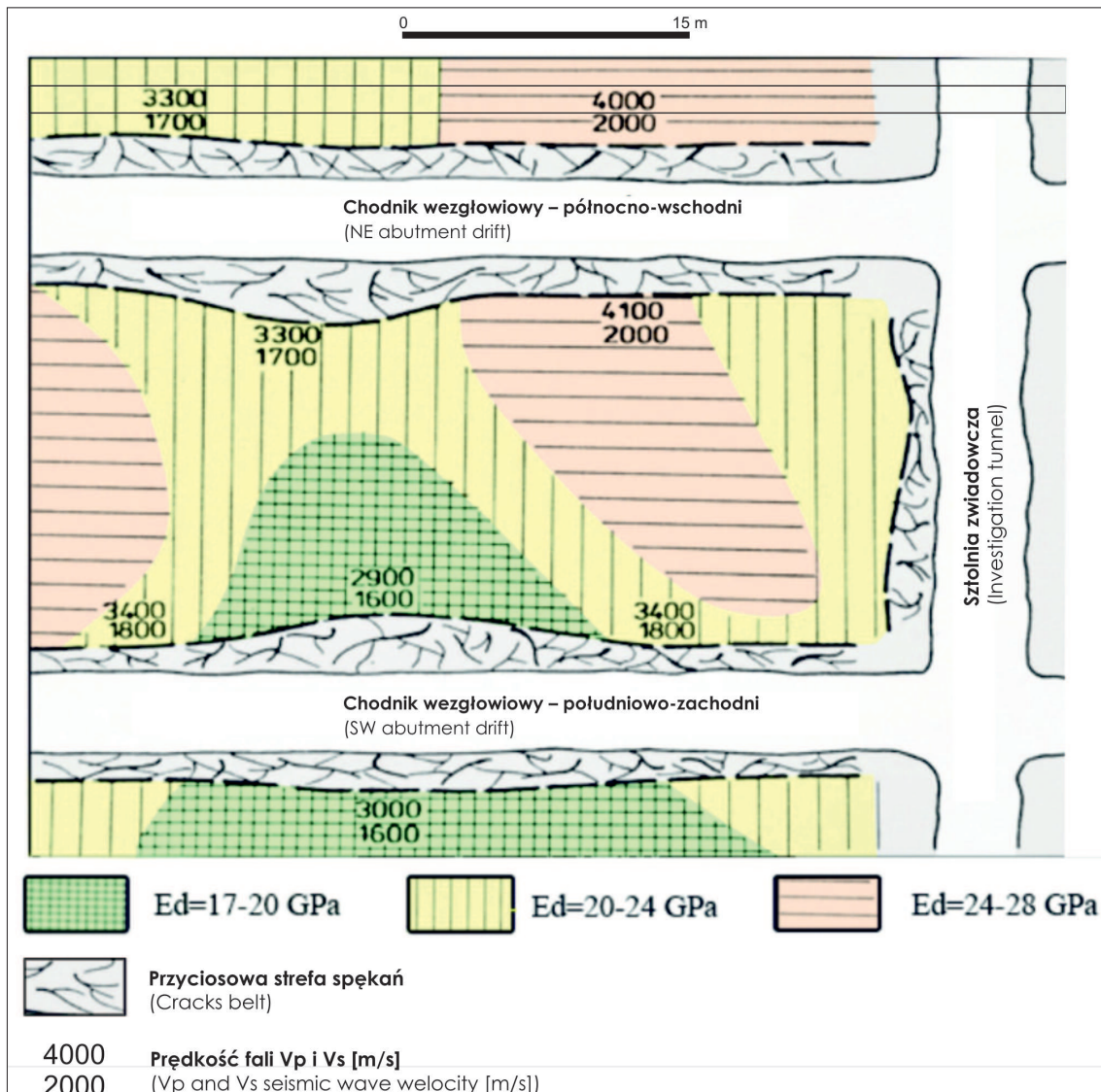
W 1970 r. ze sztolni zwiadowczej na ok. 470 i 500 m od jej wlotu wydrążono dwa poprzeczne chodniki o długości po ok. 120 m, tzw. chodniki węzłowiowe północno-wschodni i południowo-zachodni. Chodniki te w miejscu północno-wschodniej i południowo-zachodniej ściany komory elektrowni pogłębiono do poziomu jej projektowanego spągu, a od dołu, wzdłuż ich zewnętrznych ścian, wykonano żelbetową obudowę ostateczną komory. Wstępną obudowę chodników węzłowiowych i wszystkich kolejnych wyrobisk stanowiły kotwy podtrzymujące siatkę stalową oraz strop i ociosy, które pokryto betonem natryskowym (torkretem). Pomiary geofizyczne w chodnikach węzłowiowych również wykonano metodą sejsmicznego profilowania refrakcyjnego, ale profile pomiarowe były usytuowane w ociosach wyrobisk. Do rejestracji fal podłużnych było więc konieczne zastosowanie geofonów GF-7H o polaryzacji poziomej, ponieważ układ pomiarowy został obrócony o 90° w stosunku do pionu, kierunku działania siły grawitacji. Geofony mocowano w wykonanych w ociosie otworach pod kątem ok. 45° do pionu. W rezultacie takich pomiarów była możliwa równoczesna rejestracja fal podłużnych Vp i poprzecznych Vs. Możliwe było więc określenie na ich podstawie wartości dynamicznej modułu sprężystości Younga (Ed), a także wyznaczenie miąższości przy-

ociosowej strefy spękań wywołanej robotami górnictwymi. Informacja ta była pomocna do oceny czy kotwy są zamocowane w litej skale. Prędkości fal sejsmicznych podłużnych w chodnikach wezłowiowych zawierały się w przedziale $V_p = 2900\text{--}4100$ m/s, poprzecznych – $V_s = 1600\text{--}2000$ m/s, a dynamiczne wartości modułu Younga – $E_d = 17\text{--}28$ GPa. Miąższość przyociosowej strefy spękań wokół wyrobisku wynosiła ok. 1,5–3,5 m. W celu określenia jej miąższości wykonano również w kilku punktach, w otworach wywierconych w ociosach, międzyotworowe prześwietlenia sejsmoakustyczne metodą CH (*cross hole*). Określana tymi pomiarami miąższość przyociosowej strefy spękań była generalnie zgodna z uzyskiwaną pomiarami refrakcyjnymi.

W latach 1971–1974 pomiary wykonywano w kolejno dążonych wyrobiskach: sztolni komunikacyjnej, przecinca od sztolni komunikacyjnej do komory elektrowni, sztolni odpływowej i w dolnym, ok. 100-metrowym, odcinku sztolni ciśnieniowych. W wyrobiskach tych prędkości fal sejsmicznych podłużnych wynosiły $V_p = 2800\text{--}4100$ m/s, fal poprzecznych – $V_s = 1600\text{--}2100$ m/s, a dynamicznych modułów sprężystości Younga – $E_d = 15\text{--}30$ GPa. Miąższość przyociosowej strefy spękań zawierała się w prze-

dziale 1,0–3,5 m. W wyrobiskach podziemnych elektrowni były również wykonywane statyczne, wielkoskalowe, pomiary modułów sprężystości Younga (E_s). Na podstawie tych pomiarów na pięciu stanowiskach określono przelicznik E_d/E_s , zawiera się on w przedziale 3,5–4,8.

W wybranych wyrobiskach podziemnych wykonywano również pomiary metodą prześwietlania sejsmicznego. Wykonano je w rejonach, gdzie było możliwe, ze względu na wzajemną lokalizację wyrobisk, pokrycie objętej pomiarami przestrzeni wystarczająco gęstą siatką promieni sejsmicznych (odcinków łączących punkty wzbudzenia i odbioru fal). Pomiary opracowano metodą średnich arytmetycznych. Powierzchnię pomiarową dzielono na kwadraty, tak by każdy z nich przecinało kilka do kilkunastu promieni sejsmicznych, dla każdego promienia określano prędkość fali na podstawie pomiarów, a każdemu z kwadratów przyporządkowano prędkość będącą średnią arytmetyczną prędkości dla wszystkich przecinających go promieni. Tak otrzymane wartości umożliwiały odwzorowanie rozkładu prędkości fal na badanej powierzchni. Przy rejestrowanych zakresach różnicowania prędkości fal metoda dawała zadowalające rezultaty. W czasie wykonywania tych badań



Ryc. 5. Rezultaty badań sejsmicznych w rejonie komory elektrowni
Fig. 5. Results of seismic surveys in the area of the power plant chamber



Ryc. 6. Komora elektrowni
Fig. 6. Power plant chamber



Ryc. 7. Sztolnia ciśnieniowa
Fig. 7. Pressure tunnel

nie był jeszcze dostępny w Polsce i na świecie zarówno sprzęt komputerowy, jak i specjalistyczne oprogramowanie umożliwiające dokładniejsze odwzorowanie rozkładu prędkości fal metodą tomografii sejsmicznej. Przykład rezultatów uzyskanych wymienioną metodą w rejonie chodników węzłowych przedstawiono na rycinie 5.

Badania w wyrobiskach podziemnych były pomocne w bezpiecznym drażeniu i utrzymaniu podziemnych obiektów elektrowni. Określały przestrzenne zróżnicowanie modułów sprężystości masywu wokół wyrobisk oraz miąższości przyociosowej strefy spękań wokół wyrobisk co było pomocne w dobraniu optymalnej techniki kotwienia.

Na rycinie 6 przedstawiono fotografię komory elektrowni w obudowie ostatecznej, w czasie usuwania filara między ścianami komory, a na rycinie 7 fotografię końcowego odcinka sztolni ciśnieniowej, przed jej wlotem do komory elektrowni.

SKANING LASEROWY

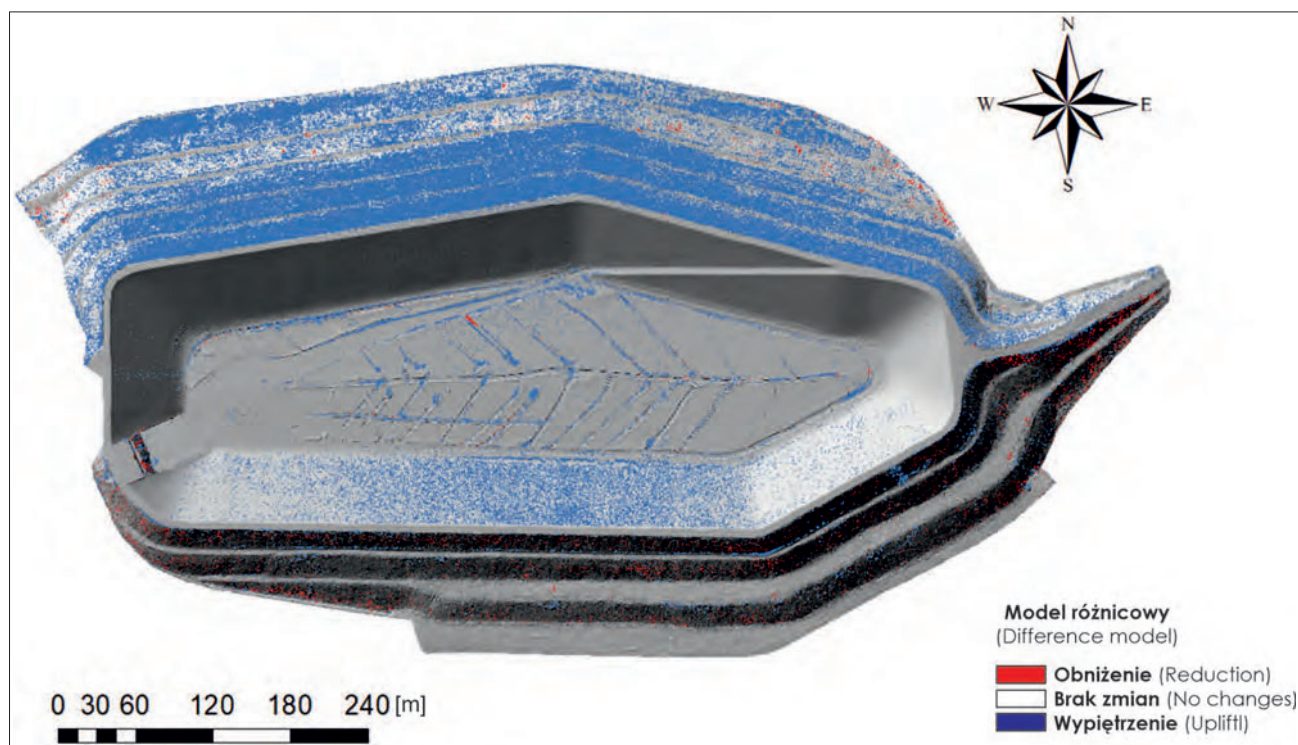
Skaning laserowy (LiDAR – *Light Detection and Ranging*) jest teledetekcyjną metodą pomiaru powierzchni terenu polegającą na emisji wiązki lasera w kierunku badanej powierzchni, a następnie rejestracji powracającego, odbitego sygnału do odbiornika. W zależności od czasu, kierunku i intensywności powracającego sygnału określone są parametry przestrzenne (XYZ) danego punktu na powierzchni terenu. W konsekwencji powstaje trójwymiarowa „chmura punktów”, która jest cyfrową reprezentacją zmierzonych obszaru. Po wstępnej klasyfikacji, czyli przypisaniu każdemu ze zmierzonych punktów definicji obiektu/obszaru, który reprezentuje w rzeczywistości, wybierane są pomiary reprezentujące wyłącznie grunt. Ze względu na dokładność oraz szybkość wykonania pomiarów LiDAR jest niezastąpioną metodą badania niedostępnych i rozległych obszarów (Ryfa i in., 2018). Do wykonania pomiarów skanowaniem laserowym ESP *Porąbka-Żar* w latach 2018–2022 użyto różnych platform pomiarowych – od bezzałogowych platform UAV, przez skaning naziemny, aż po skaning lotniczy z wysokiego pułapu (ALS). Wybór platformy pomiarowej determinuje gęstość rejestrowanej chmury punktów (tab. 1). Zastosowanie odmiennych platform pomiarowych miało na celu przetestowanie i w konsekwencji wybór najodpowiedniejszego sposobu skanowania, który pozwoli uzyskać dostatecznie gęsty i dokładny pomiar w jak najkrótszym czasie. Najlepsze rezultaty (gęste pokrycie pomiarem skarp i dna zbiornika, najdokładniejsze wpasowanie chmur punktów oraz najmniejsza różnica między pomiarem a punktami kontrolnymi (reperowymi) wykazała metoda skaningu naziemnego (Ryfa i in., 2018). Niemniej jednak jest to metoda najbardziej czasochłonna. Z tego względu do dalszych pomiarów teledetekcyjnych zbiornika *Porąbka-Żar*, w zależności od czasu, w którym pomiary mogą zostać wykonane, rekomenduje się skaning naziemny lub skaning lotniczy, którego dokładność jest zaledwie nieznacznie gorsza niż w przypadku skaningu naziemnego, a sam pomiar jest mniej czasochłonny. Skaning laserowy, pomimo że mniej dokładny od punktowych pomiarów niwelacyjnych, umożliwia powierzchniowe określenie topografii pozornie ciągłego terenu lub obiektu, pomocne dla wiarygodnej oceny jego stanu technicznego.

Pierwsze pomiary LiDAR obszaru zbiornika oraz skarp wykonano w 2018 r. Kolejne badania były przeprowadzane w odstępach rocznych aż do 2022 r. Dalsze pomiary zaniechano w 2023 r. ze względu na planowany w kolejnym roku remont generalny obiektu. Każda z kampanii pomiarowych odbyła się w trakcie opróżnienia zbiornika, co wymusza konieczność przeprowadzenia badań w okresie nie dłuższym niż 2–3 dni. Dodatkowo w 2018 r. wykonano skaning obiektu w warunkach napełnienia zbiornika (tab. 1).

Na podstawie pozyskanych danych LiDAR każdorazowo przygotowywano Numeryczny Model Terenu (NMT) o rozdzielczości 0,1 m. NMT jest reprezentacją ciągłej powierzchni terenu określonej na podstawie interpolacji chmury punktów. W następujących po sobie latach, bazując na aktualnym NMT oraz NMT z roku poprzedniego, tworzono wysokościowy model różnicowy. Dodatkowo w roku 2019 oraz 2020 na podstawie NMT wyliczono objętości osadów na dnie zbiornika oraz określono krzywe pojemności i powierzchni zbiornika (tab. 1).

Tab. 1. Zestawienie parametrów oraz opracowań obiektu *Porąbka-Żar* przygotowanych na podstawie skaningu laserowego
Table 1. Summary of the parameters and products prepared based on laser scanning of *Porąbka-Żar*

Rok wykonania pomiaru <i>Year of survey</i>	Warunki wypełnienia zbiornika <i>Reservoir filling conditions</i>	Platforma pomiarowa <i>Measurement platform</i>	Średnia gęstość chmury punktów (p/m ²) <i>Average point cloud density (pts/m²)</i>	Wykonane opracowania przestrzenne <i>Completed spatial analyses</i>
2018	1. zbiornik opróżniony <i>reservoir drained</i> 2. zbiornik pełny <i>reservoir full</i>	bezzałogowy statek powietrzny (UAV) <i>unmanned aerial vehicle</i>	1) 216,70 2) 123,57	<ul style="list-style-type: none"> • NMT • DTM – Digital Terrain Model • model różnicowy • differential terrain model • (Multi-temporal DTM analysis)
2019	zbiornik opróżniony <i>reservoir drained</i>	skaniny naziemny <i>terrestrial scanning</i>	378,39	<ul style="list-style-type: none"> • NMT • DTM – Digital Terrain Model • model różnicowy • differential terrain model • (Multi-temporal DTM analysis) • krzywe powierzchni i pojemności zbiornika • surface area and storage capacity curves of the reservoir
2020	zbiornik opróżniony <i>reservoir drained</i>	skaniny lotniczy (ALS) <i>Airborne Laser Scanning</i>	268	<ul style="list-style-type: none"> • NMT • DTM – Digital Terrain Model • model różnicowy • differential terrain model • (Multi-temporal DTM analysis) • objętość osadów na dnie • sediment volume at the bottom
2021	zbiornik opróżniony <i>reservoir drained</i>	skaniny lotniczy (ALS) <i>Airborne Laser Scanning</i>	197,58	<ul style="list-style-type: none"> • NMT • DTM – Digital Terrain Model • model różnicowy • differential terrain model (DTM)
2022	zbiornik opróżniony <i>reservoir drained</i>	skaniny naziemny <i>terrestrial scanning</i>	308	<ul style="list-style-type: none"> • NMT • DTM – Digital Terrain Model • model różnicowy • Differential terrain model (DTM)



Ryc. 8. Przykładowa mapa różnicowa przemieszczeń pionowych określona metodą skaningu laserowego przedstawiona na tle mapy zacielenia terenu (w skali szarości)

Fig. 8. An example differential settlement map determined by laser scanning set on the background of terrain shade map (grayscale)

Modele różnicowe są wynikiem porównań topografii (NMT) z dwóch okresów pomiarowych i ukazują zmiany w płaszczyźnie Z (obniżenia oraz wypiętrzenia) badanego obszaru, jednak nie wskazują w sposób bezpośredni przemieszczeń w kierunkach X i Y (Zelaya Wziątek i in., 2018).

Analizowane na przestrzeni lat 2018–2022 modele różnicowe obiektu ESP *Porąbka-Żar* umożliwiły ciągłe, powierzchniowe śledzenie zmian wysokościowych zlokalizowanych zarówno w części czaszy, jak i skarp zbiornika. Przykładowy model różnicowy zbiornika ESP *Porąbka-Żar* zaprezentowano w rycinie 8.

Jak już wspomniano warunki posadowienia zbiornika górnego elektrowni są bardzo niekorzystne. Zbiornik jest posadowiony na zuskokowanym, szczelinowatym podłożu, przez które od wschodu, od Góry Kiczery, infiltrują wody podziemne. Warstwy fliszowe na południowym zboczu są zaburzone tektonicznie i zapadają zgodnie z jego nachyleniem, co może grozić utratą stateczności zbocza i obwałowania. Dodatkowo podłoże jest poddawane cyklicznym, co kilka godzin, obciążaniem i odciążaniem masą przepompowywanej wody rzędu 2 tys. t. Stan techniczny zbiornika wymaga więc ciągłego monitoringu, w szczególności pomiarów odkształceń obwałowań i ich otoczenia. Na podstawie ostatniego, przed generalnym remontem planowanym w 2024 r., przeglądu stanu technicznego stwierdzono, że stan techniczny konstrukcji hydrotechnicznych zbiornika jest dostateczny, niezagrażający bezpieczeństwu.

PODSUMOWANIE

Przedstawione rezultaty wykazały dużą efektywność badań geofizycznych metodami sejsmiczną i elektrooporową w przestrzennym rozpoznaniu warunków posadowienia obiektów inżynierskich oraz skaningu laserowego w ocenie ich stanu technicznego.

W przypadku ESP *Porąbka-Żar* umożliwiły:

- ❑ okonturowanie i określenie przebiegu powierzchni poślizgu osuwiska na trasie derywacji, danych niezbędnych do wykonania prognozy obliczeniowej stateczności terenu w rejonie lokalizacji budynku nadszybia komory uderzeń;
- ❑ zlokalizowanie i okonturowanie strefy zaburzeń tektonicznych na południowym zboczu góry Żar, w rejonie posadowienia południowej ściany zbiornika górnego, co spowodowało konieczność zmiany konstrukcji obwałowań;

- ❑ określenie wartości i zróżnicowania parametrów sprężystości (Ed) górotworu wokół wyrobisk podziemnych elektrowni oraz określenie miąższości strefy wokół wyrobisk odprężonej i osłabionej robotami górniczymi.

Pomiary metodą skaningu laserowego w przypadku zbiornika górnego ESP *Porąbka-Żar* umożliwiły ciągły powierzchniowy monitoring przemieszczeń skarp i dna zbiornika, którego południowe obwałowanie jest posadowione na strefie uskokowej.

Dziękujemy Recenzentom za poświęcony czas i cenne uwagi, które przyczyniły się do ulepszenia naszego artykułu. Ich wnikliwie komentarze i sugestie pozwoliły nam dopracować treść oraz metodologię badawczą. Doceniamy rzetelną ocenę i konstruktywną krytykę, które miały istotny wpływ na końcowy kształt publikacji.

LITERATURA

- BIENKIEWICZ E., BILIŃSKI W. 1999 – Elektrownia Wodna Porąbka-Żar pracuje już 20 lat. *Gosp. Wod.*, 9.
- BESTYŃSKI Z. 1973 – Dokumentacja badań sejsmicznych w wyrobiskach podziemnych Elektrowni Porąbka-Żar. E-735, Arch. PBG
- BESTYŃSKI Z. 1975 – Dokumentacja badań sejsmicznych w wyrobiskach podziemnych Elektrowni Porąbka-Żar. Arch. PBG, nr inw. 14295/2023, kat S-1223.
- BESTYŃSKI Z., TROJAN J. 1975 – Metody geofizyczne w badaniach stateczności zboczy skalnych „Badanie i prognozowanie osuwisk na zboczach zbiorników wodnych we fliszu karpackim”. *Mat. Bad. IMGW, Ser. Spec.*, 4: 155–170.
- DZIEWAŃSKI J., KOMAROW I.S., MOŁOKOW L., REUTER F. 1983 – Badania geologiczne masywów skalnych w budownictwie wodnym. WG, Warszawa.
- ŁANOCHAR R. 1993 – Construction of the “Porąbka-Żar” Pumped-Storage Powar Plant, “Underground Structures in Complex Geological Conditions”. *Proceedings of Seminar Polish Committee of ICOLD, Subcommittee of Rock Foundations, Świnna Poręba, 23 September 1993.* IMGW, Warszawa.
- NEŚCIERUK P., WÓJCIK A. 1997 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Bielsko-Biała. Państw. Inst. Geol., Kraków.
- RYFA T., ZELAYA WZIĄTEK D., BAKUŁA K. 2018 – Monitoring wałów przeciwpowodziowych przy użyciu lotniczego skaningu laserowego. [W:] Winter J., Wita A., Popielski P., Sieński E. (red.), *Budowle piętrzące eksploatacji i monitoring.* Warszawa: 127–138.
- TROJAN J. 1971 – Zbiornicza dokumentacja kompleksowych badań geofizyczno-inżynierskich w latach 1968–1970 na terenie Porąbka-Żar. E-603, Arch. PBG.
- ZELAYA WZIĄTEK D., SIEŃSKI E., BAKUŁA B., SALACH A., KUCZYŃSKI Z., WEINTRIT B. 2018 – Identification of the levees failure vulnerability based on multi-sources monitoring. 27. Kongres Wielkich Zapór, Wiedeń: 736–749.

Praca wpłynęła do redakcji 24.06.2024 r.
Akceptowano do druku 18.11.2024 r.