

Zbigniew Bestyński*, Kazimierz Thiel**

BADANIA GEOFIZYCZNE W ROZPOZNANIU WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH BUDOWY TUNELI

1. Badania geofizyczne masywów fliszowych

Flisz jest osadem terygenicznym osadzonym w stosunkowo głębokim basenie morskim w wyniku sedimentacji prądów zawiesinowych. Sedymencja taka tworzy charakterystyczną sekwencję złożoną z naprzemianległych warstw osadów gruboziarnistych (piaskowce i zlepieńce) i drobnoziarnistych (mułowce i iłowce). Osady te w fazie ruchów górotwórczych zostały sfałdowane, zuskokowane i ponasuwane na siebie, tworząc skomplikowaną strukturę geologiczną.

Wieloletnie badania geofizyczne na obszarze Karpat fliszowych wykazały, że metodami geofizycznymi najbardziej efektywnymi w rozpoznaniu budowy geologicznej i właściwości geotechnicznych fliszu są metody sejsmiczne i elektrooporowe. Pomiar sejsmiczny umożliwia zlokalizowanie i okonturowanie stref koncentracji spękań związanych z tektoniką, charakteryzujących się obniżonymi prędkościami fal sejsmicznych, a elektrooporowe, na podstawie zróżnicowania opornościowego, określenie jego litologii, czyli procentowego udziału piaskowców i łupków.

Szczegółowa analiza czynników wpływających na prędkość fal sejsmicznych oraz oporność elektryczną fliszu wskazuje, że są one identyczne z czynnikami decydującymi o jego klasie geotechnicznej. Wskaźnik będący kombinacją tych wielkości umożliwia więc ocenę właściwości geotechnicznych ośrodków fliszowych z dokładnością wystarczającą na wstępnych etapach rozpoznania geotechnicznego [1, 3, 5].

Formułę na określenie klasy geotechnicznej jako funkcji wymienionych wielkości określono metodami statystyki matematycznej, przyjmując, że geofizyczny wskaźnik klasyfika-

* SEGI-AT sp. z o.o., Warszawa

** PAN Wydział IV, PKiN, Warszawa

cyjny nazwany KFG będzie równoważny liczbie klasyfikacyjnej RMR klasyfikacji geotechnicznej Z.T. Bieniawskiego.

Aproksymację przeprowadzono na podstawie rezultatów badań geofizycznych i geotechnicznych wykonanych na 20 stanowiskach pomiarowych zlokalizowanych na obszarze Karpat i obejmujących pełny zakres zróżnicowania fliszu zarówno pod względem tektoniki, jak i litologii. Zależność $KFG = f(Vp, \rho)$ aproksymowano wielomianami, dla powierzchni drugiego stopnia ma ona postać:

$$KFG = 6,4 \times 10^{-5} \rho^2 + 0,024 Vp + 2,84 \times 10^5 \rho Vp - 3,33 \times 10^{-6} Vp^2 - 18,6$$

wsp. korelacji $r = 0,926$.

Na podstawie wskaźnika KFG możliwe jest również określenie szacunkowych wartości modułów sprężystości podłużnej Es i odkształcenia D ośrodka. Korelację wartości Es i D ze wskaźnikiem KFG przeprowadzono na podstawie badań na wielkoskalowych stanowiskach pomiarowych przy powierzchni obciążenia równej 2 m^2 , zlokalizowanych w rejonach posadowienia projektowanych w Karpatach obiektów inżynierskich, głównie zapór czołowych.

Formuły na obliczenie wartości Es i D są następujące:

$$Es = 386,2 \times 100,048 KFG \text{ MPa}$$

wsp. korelacji $r = 0,850$;

$$D = 203,7 \times 100,057 KFG \text{ MPa}$$

wsp. korelacji $r = 0,867$.

Dla obliczenia wartości wskaźnika KFG ośrodka konieczna jest znajomość dwóch parametrów geofizycznych: Vp i ρ . Wielkości te na wstępnych etapach rozpoznania określa się na podstawie badań powierzchniowych.

Po wyborze trasy tunelu, w kolejnym etapie rozpoznania wykonywane są otwory wiertnicze, które z jednej strony dostarczają bezpośrednich informacji o ośrodku, a z drugiej wykorzystywane są do badań geofizycznych międzyotworowych umożliwiających szczegółowe odwzorowanie rozkładu oporności elektrycznej i prędkości fal sejsmicznych, a na ich podstawie wartości wskaźnika KFG masywu w przekroju i wzdłuż trasy tunelu.

Wskaźnik klasyfikacyjny KFG utworzono w taki sposób, by był równoważny liczbie klasyfikacyjnej RMR , możliwe jest więc wykorzystanie bogatych doświadczeń inżynierskich klasyfikacji RMR odnośnie sposobu drażenia, utrzymania i obudowy ostatecznej tuneli.

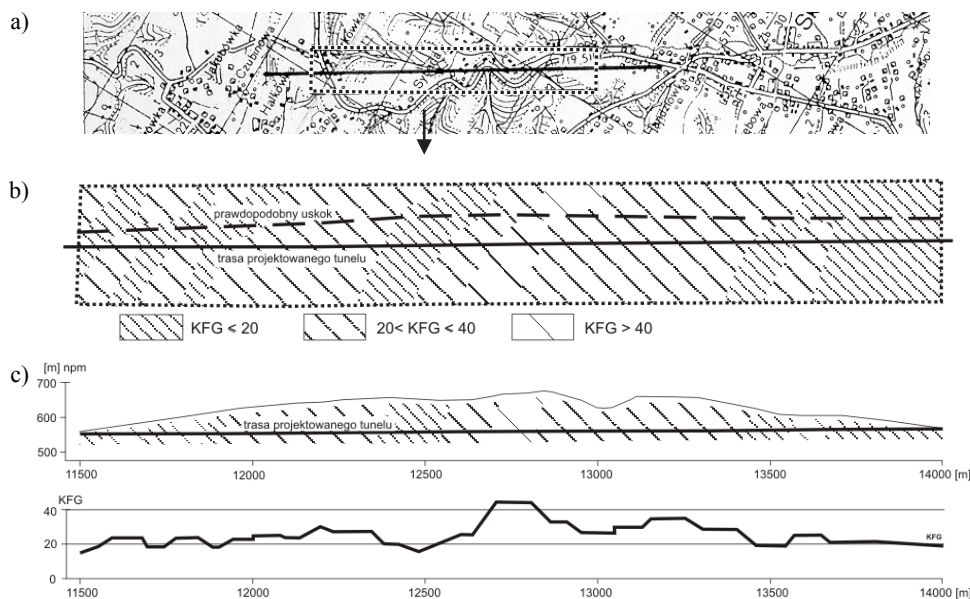
2. Przykłady badań

2.1. Tunel komunikacyjny w Zaborni na drodze szybkiego ruchu Kraków – Zakopane

Projektowany tunel (rys. 1) o długości 2,5 km wykonany będzie we fliszowych utworach Płaszczowiny Magurskiej zbudowanej z gruboławicowych piaskowców magurskich oraz łupkowych warstw hieroglifowych z cienkimi wkładkami piaskowców.

Inwestycja jest na etapie projektowania i podstawowym celem badań było stwierdzenie, czy ze względu na warunki geotechniczne budowa tunelu na wyznaczonej trasie będzie ekonomicznie uzasadniona. Badania umożliwiły uszczegółowienie rozpoznania budowy geologicznej obszaru oraz określenie warunków geotechnicznych wzdłuż trasy tunelu [3].

Na rysunku 1b przedstawiono mapę rozkładu wartości wskaźnika *KFG* w stropie litego masywu skalnego na obszarze projektowanej trasy tunelu. Otrzymane wartości ekstrapolowano na poziom tunelu posiłkując się dotychczasowym rozpoznaniem geologicznym oraz pomiarami elektrooporowymi metodą VES. W rezultacie określono zmienność wskaźnika *KFG* wzdłuż trasy tunelu (rys. 1c). Wartość wskaźnika *KFG* zmienia się w zakresie 16–42, co odpowiada III, IV i V klasie geotechnicznej, przy czym przeważa klasa IV występująca na 64% długości trasy. Warunki budowy tunelu w wybranej lokalizacji należy uznać za trudne z powodu niskich i zmiennych właściwości geotechnicznych ośrodka oraz przebiegającej w pobliżu trasy strefy tektonicznej.



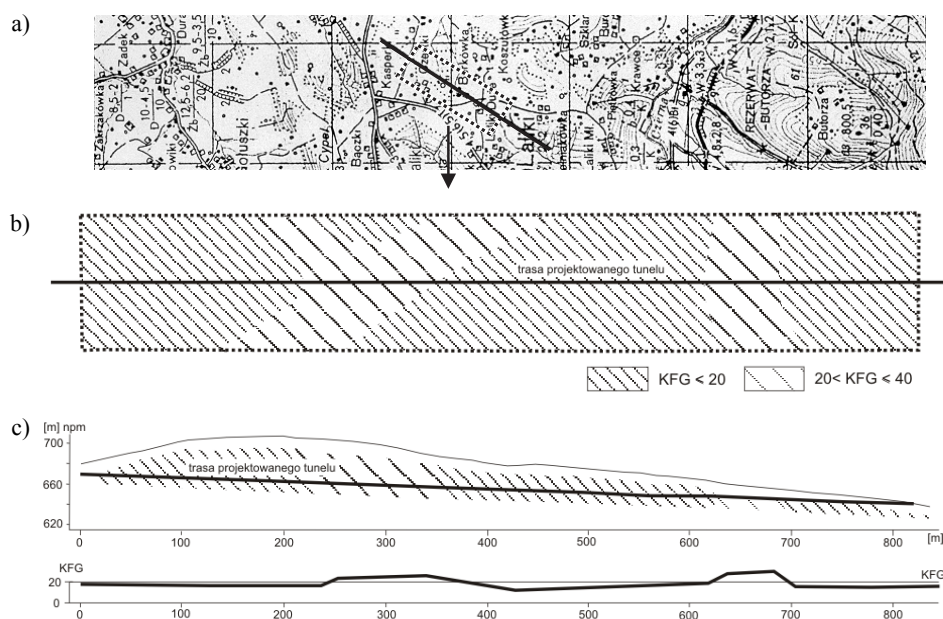
Rys. 1. Tunel drogowy w Zaborni na trasie szybkiego ruchu Kraków – Zakopane:
a) lokalizacja tunelu; b) mapa klas geotechnicznych *KFG* w rejonie tunelu;
c) klasy geotechniczne *KFG* w przekroju i na trasie tunelu

2.2. Tunel drogowy w Lalikach na trasie szybkiego ruchu Północ – Południe

Tunel (rys. 2) o długości ok. 900 m wydrążony będzie we fliszu łupkowym Płaszczowiny Śląskiej [3]. W wyniku powierzchniowych badań sejsmicznych i elektrooporowych określono zmienność wskaźnika *KFG* w stropie litego masywu skalnego na obszarze przewidywanej lokalizacji tunelu (rys. 2b).

Uzyskane w stropie masywu rezultaty ekstrapolowano na poziom tunelu, posiłkując się wynikami rozpoznania geologicznego oraz badań elektrooporowych metodą VES. Przewidywaną zmienność wskaźnika *KFG* wzdłuż trasy projektowanego tunelu, zawierającą się w przedziale 18–28, przedstawiono na wykresie na rysunku 2c.

Uzyskane rezultaty wskazują, że górotwór, w którym drążony będzie tunel, jest słaby i bardzo słaby, IV i V klasa geotechniczna, ale charakteryzuje się dość dużą jednorodnością. Warunki budowy tunelu również w tym przypadku należy uznać za trudne, ale korzystnym czynnikiem jest dość duża jednorodność ośrodka.

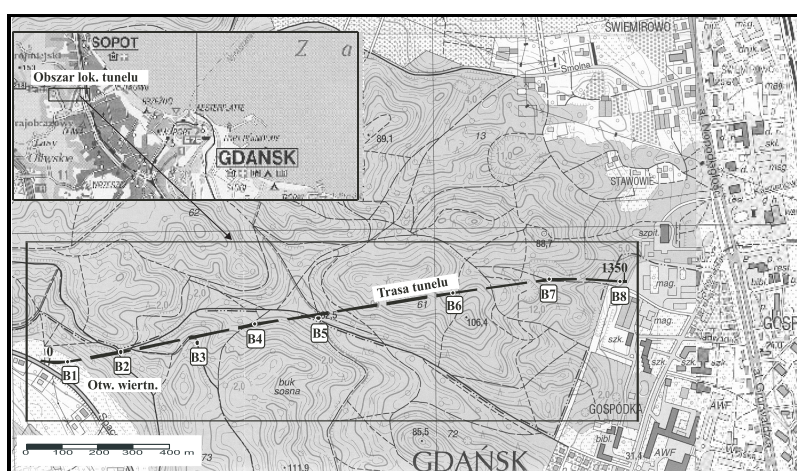


Rys. 2. Tunel drogowy w Lalikach na autostradzie Północ – Południe:
a) lokalizacja tunelu; b) mapa klas geotechnicznych *KFG* w rejonie tunelu;
c) klasy geotechniczne *KFG* w przekroju i na trasie tunelu

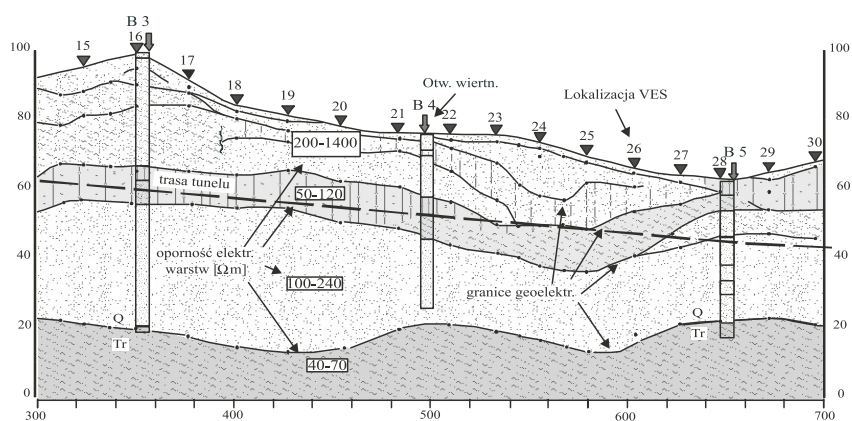
2. Badania geofizyczne osadów akumulacji wodno-lodowcowej

Północną i centralną część obszaru Polski pokrywają osady wodno-lodowcowe wykształcone w postaci warstw piaszczysto-żwirowych poprzedzielanych warstwami gliniasto-ilastymi. Osady te, w wyniku kolejnych zlodowaceń, zostały zaburzone gładitektonicznie

i często ukształtowane w pasma wzgórz morenowych. Pod pasmem takich wzgórz, stanowiących strefę krawędziową Wysoczyzny Gdańsko-Wejherowskiej, projektowany jest między Gdańskiem i Sopotem tunel komunikacyjny, który połączy Trójmiasto z jego obwodnicą (rys. 3). Spodziewane warunki geotechniczne budowy tunelu będą trudne, ponieważ jego trasa przecina zaburzone glacictektonicznie warstwy przepuszczalnych osadów piaszczysto-żwirowych i nieprzepuszczalnych osadów gliniasto-ilastych. Dla lepszego przestrzennego rozpoznania ośrodka tradycyjne badania geotechniczne zdecydowano uzupełnić badaniami geofizycznymi metodą sejsmiczną i elektrooporową [4].



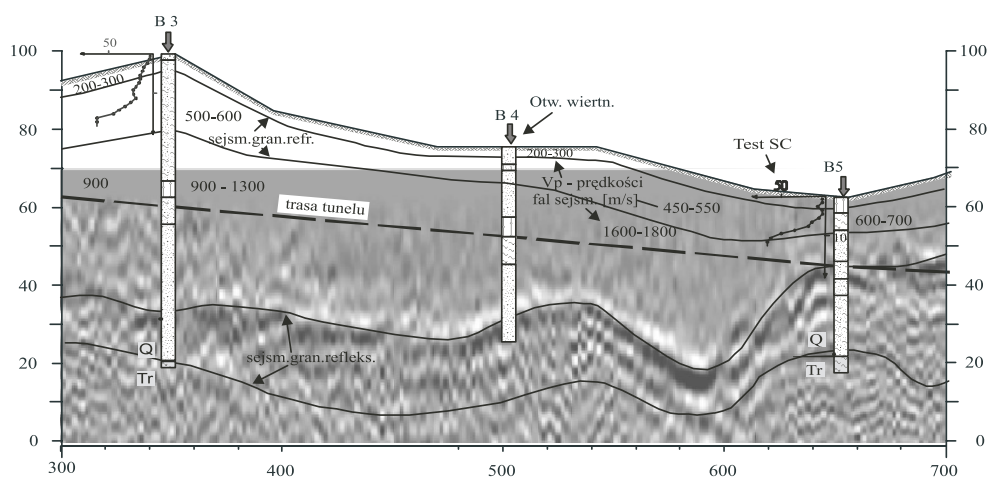
Rys. 3. Lokalizacja oraz trasa przebiegu tunelu drogowego



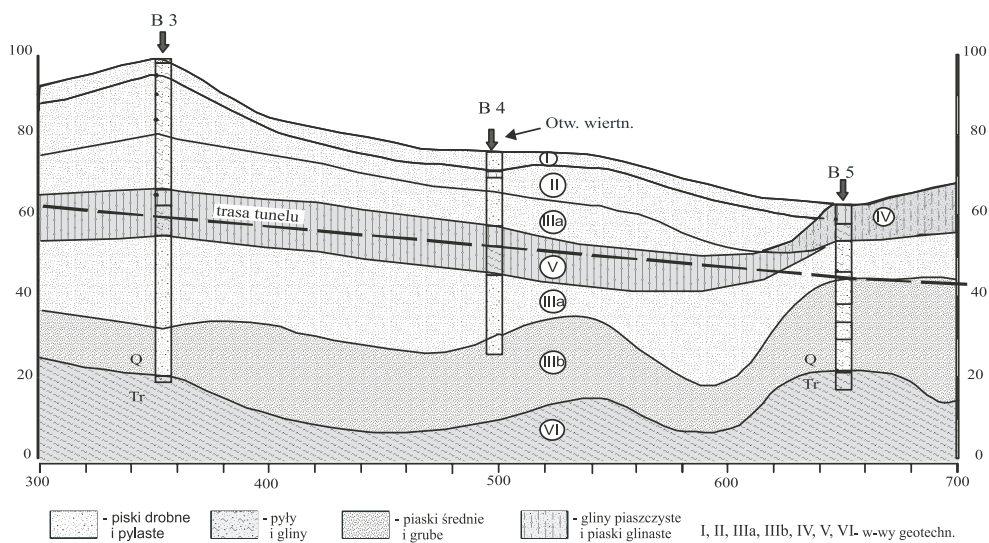
Rys. 4. Przekrój geoelektryczny wzdłuż trasy tunelu — odcinek 300÷700 m

Badaniami elektrooporowymi wydzielono w ośrodku niskooporowe warstwy gliniasto-ilaste i wyskooporowe piaszczysto-żwirowe (rys. 4), natomiast badaniami sejsmicznymi

mi wydzielono, w oparciu o zróżnicowanie prędkości fal sejsmicznych, warstwy różniące się stopniem zagęszczenia lub konsolidacji ośrodka (rys. 5). W oparciu o wymienione badania oraz otwory geologiczne i geotechniczne sporządzono przekrój geotechniczny (rys 6).



Rys. 5. Przekrój sejsmiczny wzdłuż trasy tunelu — odcinek 300÷700 m



Rys. 6. Przekrój geotechniczny wzdłuż trasy tunelu — odcinek 300÷700 m

W tabeli 1 zestawiono litologię oraz parametry geofizyczne i geotechniczne wydzielonych w ośrodku warstw geotechnicznych.

TABELA 1

Zestawienie parametrów geotechnicznych i geofizycznych gruntów na badanym obszarze

| Warstwa geotechniczna | Litologia | I_D | I_L | ρ , Ωm | V_p , m/s |
|-----------------------|---|-------|-------|---------------------------|-------------|
| I | Piaski drobne z humusem, wilgotne (Q) | 0,38 | – | zmienne | 200÷300 |
| II | Piaski drobne i pylaste, wilgotne (Q) | 0,54 | – | zmienne | 450÷700 |
| IIIa | Piaski drobne i pylaste, wilgotne do zawodn. (Q) | 0,81 | – | 100÷240 | 900÷1800 |
| IIIb | Piaski różnoziarniste, zawodnione (Q) | 0,84 | – | 100÷240 | 900÷1800 |
| IV | Piaski gliniaste i gliny piaszczyste, plastyczne (Q) | – | 0,4 | 50÷70 | 600÷700 |
| V | Piaski gliniaste i gliny piaszczyste, twardoplastyczne (Q) | – | 0,2 | 50÷120 | 900÷1800 |
| VI | Pyły i pyły piaszczyste twardoplastyczne i półzwarite ily (Trz) | – | 0,0 | 40÷70 | 900÷1800 |

3. Podsumowanie

Dotychczasowe doświadczenia w rozpoznaniu metodami geofizycznymi warunków geotechnicznych budowy tuneli wykazały dużą ich przydatność, w szczególności na wstępnym etapie rozpoznania, na etapie wyboru lokalizacji, konstrukcji i metod budowy tuneli. Dla fliszu budującego znaczną część południowych rejonów Polski, dla którego dysponowano wystarczającą ilością materiału pomiarowego, opracowano klasyfikację geotechniczną fliszu opartą na parametrach geofizycznych. Wiarygodność klasyfikacji została potwierdzona w czasie budowy sztolni hydrotechnicznych zapory Świnna Poręba oraz badań bezpośrednich wykonanych na trasie projektowanych tuneli w Lalikach i Węgierskiej Górze.

Przydatność badań geofizycznych w rozpoznaniu geotechnicznym osadów akumulacji wodno-lodowcowej została potwierdzona prezentowanymi badaniami rejonu lokalizacji projektowanego tunelu w Gdańsku – Sopotcie.

LITERATURA

- [1] *Bestyński Z., Thiel K., Zabuski L.*: Geotechniczne klasyfikacje masywów fliszowych. Rozprawy Hydrotechniczne, 52, Gdańsk, IBW PAN 1989
- [2] *Bestyński Z.*: Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Kraków, Archiwum AGH 1997 (praca doktorska)
- [3] *Bestyński Z., Thiel K.*: Geotechnical investigations at the pre-design tunnel locations. North American Rock Mech. and Tunnelling Ass. of Canada Conf., Toronto, 2002
- [4] *Bestyński Z., Thiel K.*: Geoph. Invest. to evaluate geotech. cond. in glacialat dep. along the route of planned comm. tunnel. XI Kongres ISRM, Lizbona, 2007
- [5] Praca zbiorowa, red. Thiel K.: Właściwości fizyko-mech. i modele masywów skalnych Polskich Karpat Fliszowych. Bibl. Nauk. Hydrotech. 19, Gdańsk, IBW PAN 1995