

mgr inż. Emilia Roguska<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0001-8857-1833

# Badania geofizyki otworowej na potrzeby budowy tuneli

## *Well-logging as the investigation method for the needs of tunneling*

DOI: 10.15199/33.2020.02.02

**Streszczenie.** Geofizyka otworowa jest bardzo dynamicznie rozwijającym się narzędziem badań geologicznych. Choć wykorzystuje się ją głównie w przypadku poszukiwania złóż naturalnych, to jej metody mogą także dostarczyć wielu ważnych danych przydatnych przy budowie tuneli. W artykule omówione zostały główne grupy metod badań geofizyki otworowej oraz ich zastosowanie w rozpoznaniu geotechnicznym. Podano przykłady metod najczęściej wykorzystywanych przy badaniach geologiczno-inżynierskich oraz omówiono ich zasady.

**Słowa kluczowe:** geofizyka otworowa; projektowanie tuneli; rozpoznanie geotechniczne.

**Abstract.** Well-logging is one of the most dynamically developing method of geological investigation. It is mainly used for the purposes of oil and gas exploration, still it brings a lot of informative data for tunnel design. The article describes the main methods of well-logging and their application in geotechnical investigation. The examples of methods used for this purpose were presented and the principles of their operation were discussed.

**Keywords:** well-logging; tunnel design; geological investigation.

**D**obra znajomość właściwości ośrodka skalnego podczas projektowania tunelu jest kluczowym elementem, jaki powinien decydować o jego kształcie i przebiegu. Można podać wiele przykładów, gdzie stosunkowo niewielka korekta niwelety może znacznie wpłynąć na koszty, a także na czas drążenia tunelu. Rozpoznanie warunków geotechnicznych na potrzeby budowy tuneli zawsze powinno być kilkietapowe, gdyż nawet najbardziej systematyczne, zgodne z wytycznymi i normami, pracochłonne i kosztowne badania przeprowadzone w jednej fazie rzadko dadzą dokładny obraz podłoża. W takim podejściu brakowałoby bowiem danych o obszarach, które wymagają bardziej szczegółowej analizy, a które będą kluczowe w czasie projektowania i budowy.

Źródeł danych dotyczących studiów geologicznych i geotechnicznych na potrzeby budowy tuneli jest wiele – od analiz map geologicznych, otworów archiwalnych, przez badania geofizyczne i wiercenia badawcze (pionowe, ukośne lub horyzontalne), po badania laboratoryjne. Artykuł ma na celu przedstawienie zagadnień otworowych badań geofizycznych i ich korzyści w kontekście projektowania tuneli (inne metody zostaną pominięte). Przyczynkiem do tej publikacji jest dynamiczny rozwój budownictwa tunelowego w Polsce, szczególnie na terenach górskich i podgórskich.

Obecnie trwają prace przy budowie dwóch dużych górskich tuneli drogowych, a mianowicie na Zakopiance oraz na trasie S3 Bolków – Kamienna Góra. W planie (na etapie projektowania i przygotowywania dokumentów przetargowych) są tunele drogowe na Via Carpathia (S19) na trasie z Rzeszowa do granicy słowackiej. Realizowane i planowane tunele drogowe przedstawiono na rysunku 1. Oprócz tego PKP PLK ma w planach wybudowanie łącznie 26 km tuneli. Przeszło 7,5 km będą miały tunele trasy średnicowej w Łodzi, a na trasach z Podłęża do Piekiełka oraz z Chabrow-



**Rys. 1. Budowane i planowane tunele na drogach krajowych [1]**  
 Fig. 1. Tunnels in the faze of building or design on roads in Poland [1]

ki do Nowego Sącza projektowane są tunele o łącznej długości przeszło 16 km. Jakość badań geologicznych, metody badawcze oraz rozpoznanie masywów skalnych (szczególnie fliszu karpackiego) są istotnym elementem całego procesu inwestycyjnego.

W zależności od ilości danych geologicznych i stopnia skomplikowania warunków skalnych, w pierwszej fazie należy wykonać przynajmniej jeden rodzaj badania geofizyki powierzchniowej. W kolejnych fazach projektowania wymagane są dokładniejsze badania, które polegają zazwyczaj na wykonaniu otworów badawczych, analizy rdzeni, badań laboratoryjnych na próbkach skalnych, a także badań hydrologicznych w otworach. Warto zwrócić uwagę, że wynik wstępnego rozpoznania geofizycznego wskazuje miej-

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Lądowej; erog@il.pw.edu.pl

sca na trasie tunelu, gdzie mogą wystąpić potencjalne usłoki czy miejsca wymagające dokładnych badań geologicznych. Metodą, która umożliwi uzyskanie większej liczby danych, są badania geofizyki otworowej. Dostarczają one szczegółowych i dokładnych danych o rozkładzie parametrów fizycznych w ośrodku skalnym (podstawą wykorzystania metod geofizycznych jest zróżnicowanie właściwości fizycznych różnych rodzajów ośrodków skalnych). Zalet badań geofizyki otworowej jest wiele. Pomiary dokonywane są w naturalnych warunkach, mogą obejmować dużą przestrzeń skały, a uzyskany profil jest ciągły i daje obraz właściwości skał na całej długości otworu. Po zakończeniu głębienia odwiertu wiertnica jest wyjmowana z otworu, a następnie do otworu wkłada się sondę umożliwiającą pomiar różnych właściwości skał. Sonda składa się z kilku modułów. Każdy z nich służy do pomiaru innego rodzaju parametrów. Podczas unoszenia sondy uruchamiane są poszczególne moduły, a pomiar przez nie dokonywany jest zapisywany w postaci wykresu, który obrazuje właściwości geologiczne warstw.

Jest kilka typów badań geofizycznych prowadzonych w otworach: profilowanie prędkości fal sprężystych; profilowanie elektrometryczne; profilowanie jądrowe; pionowe profilowanie sejsmiczne i tomografia sejsmiczna, a także narzędzia obrazowania ścianek otworu. Przydatność zastosowania poszczególnych typów badań podano w tabeli. Badania geofizyczne prowadzone są zazwyczaj kilkoma technikami, a ich interpretację trzeba zawsze przeprowadzać łącznie.

### Wybrane metody badań geofizycznych wraz z ich przydatnością na cele budowy tuneli

*Chosen methods of well-logging and their use in tunneling*

	Promieniowanie naturalne gamma	Profilowanie potencjałów naturalnych	Profilowanie akustyczne	Profilowanie objętościowe	Profilowanie neutronowe	Profilowanie oporności	Obrazowanie optyczne/akustyczne	Analiza rdzenia
Litologia	wysoka	wysoka	dobra	dobra	dobra	dobra	dobra	wysoka
Porowatość			wysoka	wysoka	wysoka			wysoka
Typ cieczy				wysoka	wysoka	wysoka		wysoka
Nasycenie cieczą				wysoka	wysoka	wysoka		wysoka
Przepuszczalność		dobra	dobra	dobra	dobra	dobra		wysoka
Stratygrafia	dobra	dobra					wysoka	

### Profilowanie prędkości fal sprężystych

W przypadku budowy tuneli ważne z punktu widzenia badań geologicznych są metody profilowania zmian prędkości fal sprężystych. Obejmują one pomiar zmian prędkości sprężystej fali P, fal P i S oraz profilowanie akustyczne, które wykorzystuje fale P o bardzo dużej częstotliwości, dzięki czemu uzyskuje się dokładny obraz. Jest kilka rodzajów badań zależnych od umiejscowienia nadajnika i odbiornika fal (nadajnik może być zlokalizowany na powierzchni terenu, a odbiornik w odwiercie, lub odwrotnie). W pomiarach na potrzeby inżynierskie najczęściej wykorzystywane są jednak sondy zawieszane, w których nadajnik i odbiorniki zlokalizowane są w otworze. Różnica czasu przejścia fali od nadajnika do odbiorników dostarcza informacji o właściwościach skał.

Z grupy metod geofizycznych najczęściej do celów projektowania tuneli wykorzystywane są **badania profilowania akustycznego**, zwanego też czasem profilowaniem sonicznym czy mikrosejsmicznym. Badanie wykonywane jest w odwiercie niezarurowanym, wypełnionym płynem. Wykorzystywana jest pojedyncza sonda, na której umieszczone są odbiorniki i nadajnik. Odległość pomiędzy nadajnikiem a najbliższym odbiornikiem to ok. 30 cm, pomiędzy odbiornikami – kolejne 30 cm. Sonda emituje fale P (fale akustyczne) o częstotliwości  $10 \div 50$  kHz, które pozwalają na uzyskanie dokładnego profilu skał wokół otworu (sonda ta ma możliwość wykrycia i zarejestrowania nawet małych zmian, jak cienkie przewarstwienia czy spękania wzdłuż odwiertu). Metody akustyczne pozwalają wyznaczyć parametry mechaniczne skał. Technika pomiarów i najważniejsze zalecenia opisane zostały szczegółowo w wytycznych ISRM [2]. Dzięki temu badaniu można wyznaczyć dynamiczny moduł Younga i dynamiczny moduł Poissona oraz ich rozkład na całej długości odwiertu. W przypadku poszukiwania i wydobywania złóż, wyznaczenie dynamicznych współczynników Poissona i Younga jest istotne, gdyż umożliwia opis procesu szczelinowania oraz prawidłowy dobór płynu szczelinującego i wydajności jego tłoczenia. Natomiast w przypadku tunelowania znajomość tych modułów jest niezwykle istotna w doborze parametrów materiałów wybuchowych przy odstrzałach podzodka.

### Profilowanie elektrometryczne

Profilowanie elektrometryczne to grupa metod określających oporność elektryczną skał wokół otworu. Do tej grupy zaliczane są metody mierzące zarówno oporność skał na prąd wzbudzany w nadajniku, jak również polegające na mierzeniu polaryzacji naturalnej. Ta grupa metod jest wykorzystywana przede wszystkim do określenia warunków hydrologicznych, ponieważ oporność elektryczna i potencjały naturalne są silnie zależne od zawodnienia. Na potrzeby budowy tuneli profilowanie dostarcza przede wszystkim informacji o warstwach wodonośnych. Umożliwia także określenie zmienności litologicznej warstw, ponieważ oporność elektryczna różnych rodzajów skał jest różna, a ponadto zmienia się wraz ze zmianą stopnia ich zwiertzenia. Profilowanie potencjałów naturalnych odbywa się przez pomiar dokonywany pomiędzy dwiema elektrodami – jedną na powierzchni terenu, drugą w otworze. Profilowanie wykorzystuje zjawisko polaryzacji samoistnej bez zewnętrznego pola elektrycznego. Niektóre warstwy skalne wykazują polaryzację dodatnią (łupki), inne – ujemną (piaskowce). Na podstawie zmian polaryzacji można zatem określić rodzaj skał występujących w otworze, a także zmiany stosunków wodnych.

### Profilowanie radiometryczne (jądrowe)

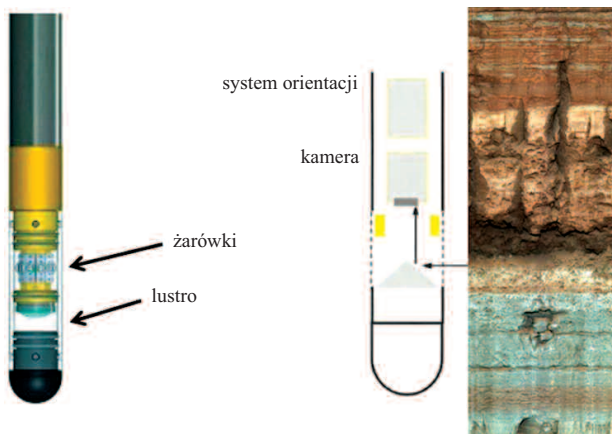
Grupa metod profilowania jądrowego, analogicznie do metod z grupy profilowania elektrometrycznego, obejmuje zarówno pomiar promieniowania naturalnego (profilowanie pasywne), jak i pomiar reakcji ośrodka na promieniowanie wzbudzone przez sondę. Pomiar promieniotwórczości naturalnej gamma wykorzystuje występowanie w skałach naturalnych emitentów promieniowania gamma. Są one związane

z obecnością pierwiastków promieniotwórczych  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i izotopu  $^{40}\text{K}$ . Ogromną zaletą promieniowania radiometrycznego jest to, że można je wykonywać w otworach zarurowanych i niezarurowanych, pustych lub wypełnionych płynem. Zasięg śledzenia tego badania zależy od typu osadów występujących w otworze i średnio wynosi ok. 0,5 m [3]. Wartość promieniowania naturalnego zależy od rodzaju skały. Skały wykazujące niski poziom promieniowania zwane są skałami „czystymi”. Należą do nich piaskowce i wapień. Skały, które generują wysoki poziom promieniowania naturalnego gamma, zawierają dużo minerałów ilastych – w przybliżonej interpretacji promieniowanie to wykorzystywane jest jako wskaźnik zailenia.

### Obrazowanie ścianek otworu

Obrazowanie optyczne to technologia, która pozwala zarejestrować obraz skały w otworze za pomocą kamery. Zazwyczaj obliczenie liczby spękań skały odbywa się na podstawie analizy rdzenia. W tej analizie nie ma jednak możliwości uwzględnienia takich czynników, jak uszkodzenie rdzenia podczas urabiania czy wydobywania. Dzięki telewizorowi optycznemu istnieje możliwość dokładnego obejrzenia skały, określenia stopnia jej spękania czy kierunku upadu warstw bezpośrednio w maszywie skalnym. Daje to dużą dokładność i pewność otrzymanych wyników. Budowę sondy oraz obraz skały otrzymanej za jej pomocą pokazano na rysunku 2. Jednocześnie z rejestrowaniem obrazu rdzenia sonda gromadzi dane dotyczące orientacji przestrzennej, dzięki czemu możliwa jest interpretacja kierunków nieciągłości. Obrazowanie optyczne można przeprowadzić w otworach pustych lub wypełnionych płynem. W tym drugim przypadku należy jednak pamiętać, że zawieszane cząstki skał unoszące się w płynie zamazują obraz. Należy więc odczekać, zanim cząstki opadną. Sondy optyczne dają też informacje dotyczące przepływu wód w otworze wiertniczym.

W przypadku otworów wypełnionych płynem, w szczególności nieprzezroczystym, narzędziem dającym sporo informacji o ściankach otworu jest obrazowanie akustyczne, polegające na pomiarze czasu przejścia fali akustycznej przez skałę. Stały przetwornik wytwarza impulsy, które są kierowane na obracającą się powierzchnię lub lustro akustyczne w sondzie.



Rys. 2. Budowa telewizora optycznego wraz z przykładowym wynikiem badań

Fig. 2. Optical televiewer with the logging results

Źródło: lim.eu

Wyznaczenie parametrów skał czystych, wysokoporowatych o dużej miąższości może być wykonane za pomocą niewyszukanych technicznie metod pomiarowych. Badania prowadzone w bardziej złożonych warunkach geologicznych wymagają ciągłego doskonalenia metod badawczych. Do najważniejszych czynników komplikujących badania należy występowanie warstw cienkich, czyli takich, których miąższość jest mniejsza niż pionowy zasięg sond wynoszący w przypadku: upadomierza – kilka centymetrów; sond jądrowych i akustycznych – kilkanaście do kilkudziesięciu centymetrów; sond radiometrycznych – kilka metrów. Dodatkowo, czynnikiem komplikującym analizę jest zmienność średnicy otworu, która zależy od stanu naprężeń, ale także od pęcznienia łupków czy samego procesu urabiania. Jednocześnie, wyniki sondowania są wrażliwe na zmienność średnicy otworu i uzyskanie precyzyjnych wyników wymaga kalibracji w odniesieniu do wielkości otworu. Do pomiaru wielkości otworu służy moduł oznaczany jako CALI (rysunek 3), wyposażony w ramio-



Rys. 3. Moduł CALI do pomiaru szerokości otworu

Źródło: <http://www.sparteksystems.com>

Fig. 3. CALI module for borehole diameter investigation

na mierzące wielkość otworu. Umożliwia on kalibrację wyników innych modułów, których odczyty są zależne od wielkości otworu. Na tej podstawie wyciąga się także wnioski dotyczące litologii – w miejscach wymywania otwory są szersze, a więc skały są tam mniej zwarte czy bardziej miękkie.

\* \* \*

Geofizyka jest bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedziną, a jej metody mają coraz większe zastosowanie w dziedzinie budowy obiektów podziemnych, także w Polsce. Aby wyniki były wiarygodne, należy badania przeprowadzić z zachowaniem ich standardów i najwyższą starannością. Wszystkie etapy badań geofizycznych – planowanie, zbieranie danych, ich przetwarzanie i interpretacja muszą zostać starannie przygotowane. Badania wykonane niezgodnie z zaleceniami mogą bowiem prowadzić do błędnych wyników.

### Literatura

- [1] Kaczor Malwina. 2019. „Tunele w Polsce – Stan obecny i plany na przyszłość.” *Mosty* (5): 34 – 37.
- [2] Takahashi T., T. Takeuchi, K. Sassa. 2006. „ISRM Suggested Methods for Borehole Geophysics in Rock Engineering.” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (3): 337 – 368. <https://doi.org/10.1016/J.IJRMMS.2005.09.003>.
- [3] Zorski Tomasz, Jadwiga Jarzyna, Arkadiusz Derkowski, Jan Śródoń. 2013. „Geofizyka otworowa w dobie poszukiwań gazu w łupkach: modele interpretacyjne i specyfika zastosowań w zagadnieniach rozpoznawania złóż gazu z łupków.” *Przegląd Geologiczny* 61 (8): 478 – 488.

Przyjęto do druku: 29.01.2020 r.