

BADANIA GEOELEKTRYCZNE NA PRZEDPOLU OSUWISKA W KOPALNI DIABAZU „NIEDŹWIEDZIA GÓRA” KOŁO KRZESZOWIC

**Geoelectric research on the foreland of the landslide
in “Niedźwiedzia Góra” Diabase Quarry near Krzeszowice,
south Poland**

Włodzimierz Jerzy MOŚCICKI & Janusz ANTONIUK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: moscicki@geol.agh.edu.pl,
antoniuk@geolog.geol.agh.edu.pl*

Treść: Na terenie Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra” koło Krzeszowic od wielu lat notowane były zjawiska o charakterze osuwiskowym. Przejawiały się one w utworach czwartorzędowego nadkładu w sąsiedztwie południowej skarpy wyrobiska. Późną wiosną 2005 roku wystąpiły znaczne opady atmosferyczne, w wyniku których we wspomnianym terenie gwałtownie rozwinęła się duża forma osuwiskowa zagrażająca normalnej działalności wydobywczej w kopalni. Szybkie przystąpienie do prac zabezpieczających wymagało określenia genezy osuwiska i jego uwarunkowań geologicznych. W tym celu w okresie letnim 2005 oprócz terenowych badań geologicznych wykonano pomiary geofizyczne. Na podstawie przeprowadzonych na południowym przedpolu kopalni badań geoelektrycznych (profilowania indukcyjne, sondowania elektrooporowe i tomografia elektrooporowa) określono płytką budowę geologiczną oraz wskazano na potencjalne kierunki zasilania wycieków wody obserwowanych w obrębie osuwiska.

Słowa kluczowe: osuwisko, badania geofizyczne, sondowania elektrooporowe, tomografia elektrooporowa, profilowania indukcyjne

Abstract: In the “Niedźwiedzia Góra” Diabase Quarry located near Krzeszowice (south of Poland), a big landslide occurred in the late spring 2005. Direct reasons of that event were massive rainfalls in the region. The landslide was a threat to the regular exploitation of the quarry. To protect the pit quickly and properly, there was an urgent need to explain the genesis of the landslide. A detailed geological survey was performed followed by geophysical measurements. The former included geoelectric methods: DC resistivity soundings, EM profiling and earth resistivity tomography. Based on the geophysical survey, the shallow geology of the southern foreland of the quarry was established. The possible paths of underground water flow and their relation to outflows of water observed in the landslide were indicated.

Key words: landslide, geophysical research, DC resistivity sounding, EM34-3 profiling, earth resistivity tomography

WSTĘP

Wiosną 2005 roku na terenie Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra” koło Krzeszowic uaktywniło się znaczne osuwisko. Bezpośrednią przyczyną uruchomienia procesów osuwiskowych było wystąpienie długotrwałych, obfitych opadów deszczu. Rozwój i dynamika tego zjawiska stwarzały zagrożenie dla prowadzenia normalnej działalności wydobywczej kopalni. Przystąpienie do akcji zahamowania, zabezpieczenia, a w dalszej perspektywie rekultywacji osuwiska wymagało rozpoznania jego uwarunkowań geologicznych i hydrogeologicznych. Podjęte szczegółowe, terenowe prace geologiczne pozwoliły określić ułożenie i litologię warstw w nadkładzie złoża diabazu, a w konsekwencji – w znacznym stopniu odtworzyć przyczyny powstania osuwiska (Gałaś & Paulo 2006). Uzyskanie pełniejszych informacji o genezie zjawiska wymagało dodatkowo scharakteryzowania budowy hydrogeologicznej na południowym przedpolu wyrobiska. W tym celu zastosowano powierzchniowe badania geofizyczne – profilowania indukcyjne, sondowania elektrooporowe, oraz tomografię elektrooporową. Na podstawie tych badań, przeprowadzonych w odpowiedniej sekwencji metodycznej – od rozpoznania ogólnego do bardziej szczegółowego – możliwe było określenie prawdopodobnych stref zasilania wycieków wody obserwowanych w obrębie i w otoczeniu czaszy osuwiska i mających podstawowe znaczenie dla stabilności skarpy wyrobiska.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA MIEJSCA BADAŃ

Złoże diabazu Niedźwiedzia Góra położone jest ok. 20 km na zachód od Krakowa i znajduje się w obrębie zrębowego Pasma Tenczyńskiego. Garb Tenczyński stanowi wypiętrzony blok skał paleozoicznych (karbon-perm), przykrytych płatami jury i czwartorzędu. Jest on ograniczony od południa rowem Rybnej, a od północy Rowem Krzeszowickim, wypełnionymi utworami trzeciorzędu.

Złoże diabazu ma nierówny strop. W otoczeniu skarpy, na której powstało osuwisko, strop diabazu można obserwować na wysokościach: około 300 m n.p.m. w części wschodniej wyrobiska, ok. 272 m n.p.m. w części środkowej, poniżej osuwiska, i ok. 296 m n.p.m. po stronie zachodniej. Długość południowej skarpy wynosi około 400 m.

W okolicach Tenczynka – Niedźwiedziej Góry można wyróżnić trzy kompleksy utworów czwartorzędowych: dolny, środkowy i górny (Rutkowski *et al.* 1993, 1994, 1998).

Kompleks dolny jest złożony ze żwirów i piasków leżących lokalnie na mułkach. Są to osady rzeczne lub wodno-lodowcowe wypełniające nierówną powierzchnię erozyjną podłoża i wykazujące zmienną grubość w przedziale 0–19 m.

Kompleks środkowy składa się głównie z mułków podścielonych ilami warwowymi. Ma on średnią grubość 40 m, a przy brzegu Kotliny Tenczynka (jak to ma miejsce w Niedźwiedziej Górze) może się wyklinowywać. Górna część kompleksu środkowego była dobrze odsłonięta w niszy osuwiska i na południowej skarpie wyrobiska.

Kompleks górny zbudowany jest z kilku warstw piasku o zmiennej miąższości. Zdarzają się w nim warstwy dobrze wysortowanych piasków średnio- do drobnodziarnistych obok pylastych oraz pylastego piasku ze żwirem. Łączna miąższość kompleksu wynosi

5–10 m. Leży on na pożłobionej powierzchni kompleksu środkowego lub bezpośrednio na podłożu paleozoicznym i mezozoicznym.

Osuwisko uruchomiło się na południowej skarpie kamieniołomu, poniżej skrzyżowania drogi technicznej okalającej wyrobisko i prowadzącej do kamieniołomu Zalas, z drogą skierowaną do wnętrza wyrobiska, w kierunku ściany wschodniej (Fig. 1).

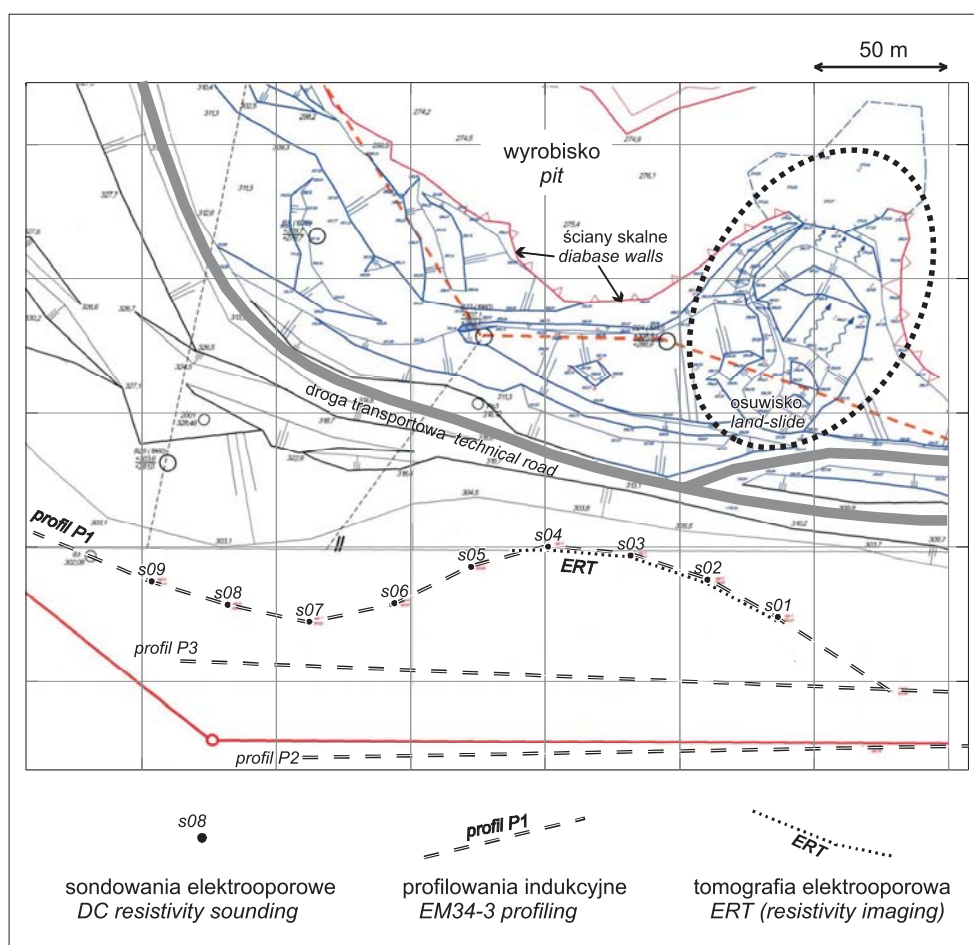


Fig. 1. Lokalizacja badań geoelektrycznych na południowym przedpolu Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra”

Fig. 1. Location of geoelectrical survey made at the southern foreland of “Niedźwiedzia Góra” Diabase Quarry

W ścianie niszy osuwiska można było obserwować profil utworów czwartorzędowych – górną część kompleksu środkowego i znaczną część kompleksu górnego. Na wysokości 293–294 m n.p.m. u podnóża głównej ściany pojawiały się wypływy i wysięki wody, które z całą pewnością odgrywały znaczącą rolę w rozwoju osuwiska. Rozpoznanie potencjalnego

obszaru zasilania tych wycieków – południowego zaplecza osuwiska – było celem badań geofizycznych. Miały one określić płytką budowę geologiczną (do 20 m p.p.t.) oraz stosunki wodne w tym rejonie.

BADANIA GEOFIZYCZNE

Badania geofizyczne wykonano na południe od wspomnianej drogi transportowej Zalas – Niedźwiedzia Góra – Krzeszowice.

Zastosowano trzy powierzchniowe metody geoelektryczne (np. Antoniuk & Mościcki 1995, 1996, Dahlin 1996, Mościcki & Antoniuk 1999, Antoniuk *et al.* 2004):

- 1) dipolowe profilowania indukcyjne,
- 2) sondowania elektrooporowe,
- 3) tomografię elektrooporową.

Lokalizacja wykonanych badań geoelektrycznych przedstawiona jest na figurze 1. Obszar badań obejmował teren porośnięty młodnikiem, co ograniczało swobodę w lokalizowaniu linii i stanowisk pomiarowych.

Dipolowe profilowania indukcyjne przeprowadzono przy użyciu aparatury EM34-3 Geonics (McNeill 1980). Aparatura ta mierzy tzw. przewodność pozorną ośrodka σ_a , będącą wypadkową przewodnością elektryczną utworów geologicznych znajdujących się w „polu widzenia” układu pomiarowego. Stosowano układ pomiarowy HD – dwie pionowe, ustawione współpłaszczyznowo cewki: nadawcza i odbiorcza. Odległość między cewkami, czyli rozstaw układu, wynosiła: 10, 20 lub 40 metrów (układy HD10, HD20 i HD40), dzięki czemu możliwe było rozpoznawanie budowy geologicznej odpowiednio do głębokości około 7.5 m, 15 m i 30 m. Są to wartości orientacyjne, bowiem wpływ na głębokość penetracji ma, oprócz wielkości rozstawu, również budowa ośrodka i właściwości elektryczne skał. Krok profilowania wynosił 5 metrów.

Sondowania elektrooporowe wykonywano 4-elektrodowym układem Schlumbergera. Rozstawy układu pomiarowego zwiększano w postępie geometrycznym $AB/2 = 1.47, 2.15, 3.16, \dots, 68.4, 100$ m. Stosowano trzy wielkości dipola potencjałowego $MN/2 = 0.4$ m, 2 m i 10 m. Wyniki ilościowej interpretacji krzywych sondowań, przeprowadzonej w oparciu o model jednowymiarowy (1D), przedstawione zostały w formie głębokościowych profili geoelektrycznych – „słupków” – składających się z warstw o wyinterpretowanych opornościach i miąższościach. Warstwom geoelektrycznym wyodrębnionym w profilu, na podstawie wartości ich oporności, można przypisać przybliżony charakter litologiczny, a niekiedy także pewne cechy hydrogeologiczne, np. zawodnienie.

Tomografię elektrooporową (ERT – *Earth Resistivity Tomography*, inaczej: obrazowanie elektrooporowe lub *resistivity imaging*) zastosowano w końcowym etapie badań, na 100-metrowym fragmencie profilu P1. Wycinek ten został wybrany na podstawie wyników profilowań indukcyjnych i sondowań elektrooporowych. Pomiary wykonano układem Wennera z krokiem pomiarowym 1 m. Interpretację przeprowadzono przy użyciu programu RES2DINV firmy Geotomo Software (Loke 2003). W efekcie otrzymano dwuwymiarowy (2D) przekrój geoelektryczny na omawianym fragmencie profilu P1.

W celu porównywania wyników pomiarów indukcyjnych z elektrooporowymi przewodność pozorna mierzona w mS/m przeliczana była w pewnych przypadkach na oporność pozorną ośrodka ρ_a , podawaną w Ωm .

GEOELEKTRYCZNA CHARAKTERYSTYKA UTWORÓW CZWARTORZĘDOWYCH

Poniżej podano wybrane, ogólne uwagi na temat własności geoelektrycznych utworów czwartorzędowych. Informacje te mają istotne znaczenie przy ocenianiu charakteru litologicznego warstw na podstawie ich oporności wyznaczonej badaniami geoelektrycznymi.

Główne minerały skałotwórcze, takie jak kwarc, skalenie, mika, są praktycznie izolatorami elektrycznymi. W związku z tym oporność elektryczna utworów czwartorzędowych zależy w decydującym stopniu od zawartości w skałach dwóch, powszechnie występujących, składników dobrze przewodzących prąd elektryczny: wody i materiału ilastego. Oporność naturalnych wód podziemnych najczęściej mieści się w przedziale od 100 Ωm do 1 Ωm . Maleje ona ze wzrostem mineralizacji i z podnoszeniem się temperatury. Tak więc, zwiększenie ilości wody zawartej w przestrzeni porowej (kosztem powietrza – izolatora elektrycznego) powoduje obniżenie oporności skały. Iły (skała) charakteryzują się małymi wartościami oporności, od 1 Ωm (morskie) do 25 Ωm (lądowe). Im większa jest zawartość materiału ilastego w skałe, tym mniejsza jest jej oporność. Ponieważ zarówno zawartość składnika ilastego, jak i obecność wody (zwłaszcza o podwyższonej mineralizacji) obniżają oporność skały, zdarzają się przypadki niejednoznaczności w ocenie charakteru litologicznego skały na podstawie jej oporności. W przypadku badania utworów piaszczystych często trudno jest rozstrzygnąć, czy niskie wartości oporności są skutkiem zawodnienia czy też zailenia.

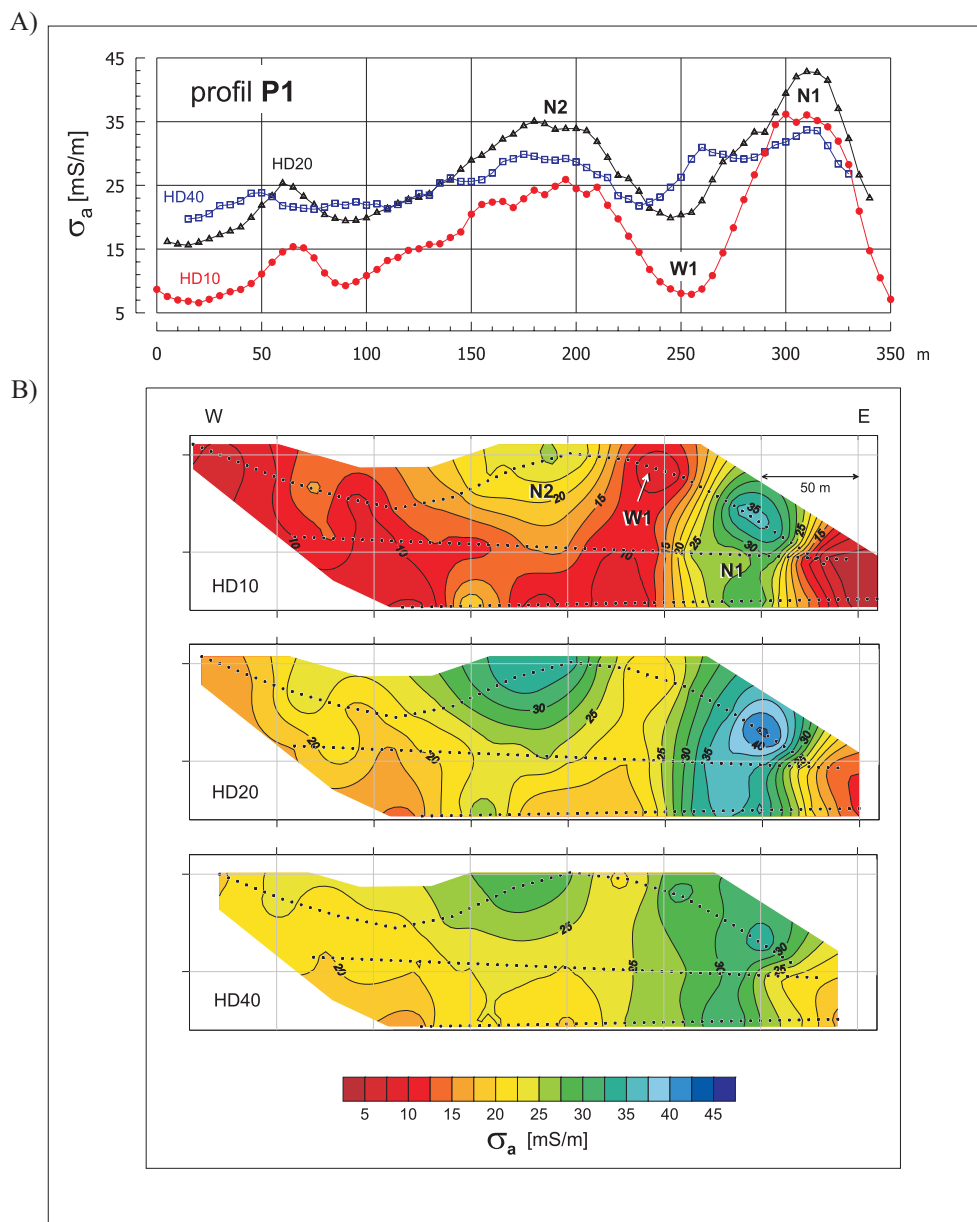
W oparciu o pomiary przeprowadzone w otoczeniu osuwiska można było podać następującą, ogólną charakterystykę opornościową występujących tu utworów czwartorzędowych:

- piaski (bardzo czyste, w strefie aeracji) – 1000 i więcej, nawet do kilku tysięcy Ωm ;
- piaski zawodnione lub wilgotne – od 100 do kilkuset Ωm ;
- iły, mułki (gliny) – 10–30 (60) Ωm .

Skały podłoża, które mogły znajdować się w zasięgu badań geoelektrycznych (diabazy, wapienie), należą do skał o relatywnie wysokiej oporności, od kilkuset do tysięcy Ωm .

WYNIKI BADAŃ GEOELEKTRYCZNYCH

Badania geoelektryczne rozpoczęto od wykonania pomiarów indukcyjnych na profilach P1, P2 i P3. Analiza wykresów profilowań wykazała występowanie na obszarze objętym badaniami stref cechujących się małymi ($\sigma_a < 10$ mS/m) lub dużymi (30–45 mS/m) wartościami przewodności pozornej. Szczególnie wyraźnie strefy te widoczne były na wykresach profilowań „najpłytszym” układem HD10 (Fig. 2A).



Rys. 2. Wyniki dipolowych profilowań indukcyjnych: A) wykres przewodności pozornej dla profilu P1; W1, N1, N2 – wyznaczone strefy anomalne; B) mapy przewodności pozornej dla układów HD10, HD20 i HD40

Fig. 2. Results of EM34-3 profiling: A) apparent conductivity profiles for measuring line P1; W1, N1 and N2 – selected anomalous zones; B) contours of the apparent conductivity for HD10, HD20 and HD40 spacings

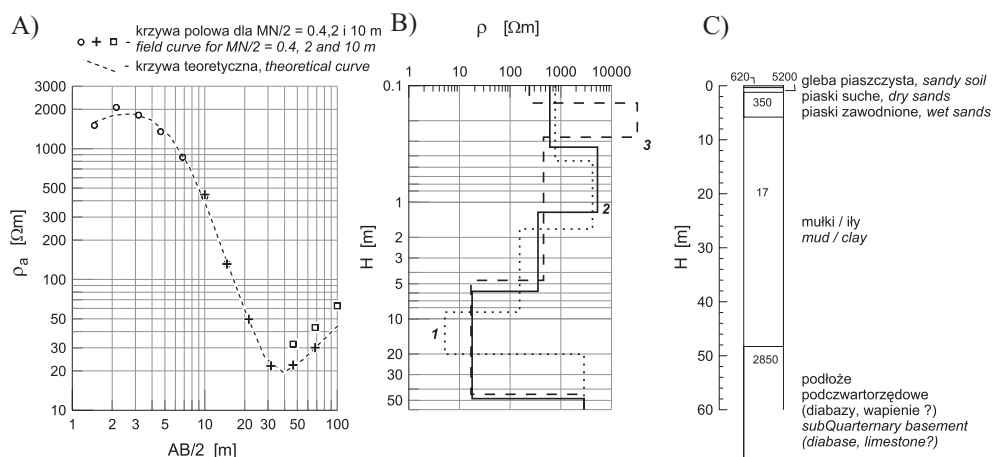
W celu prześledzenia powierzchniowego zasięgu i granic wspomnianych wyżej stref sporządzono mapy przewodności pozornej dla wszystkich rozstawów profilowań indukcyjnych (Fig. 2B). Główną strefę wysokooporową oznaczono symbolem W1, a otaczające niskooporowe – N1 i N2.

Z porównania map widać, że na badanym obszarze największe zróżnicowanie wartości przewodności pozornej i jednocześnie najniższe jej wartości obserwuje się na mapie σ_a , sporządzonej dla układu HD10. Układami o głębszej penetracji mierzone są – generalnie – większe wartości przewodności pozornej. Na przykład, na mapie otrzymanej z pomiarów układem HD40 nie występują już małe wartości σ_a (< 15 mS/m), które dominują na mapie dla HD10 na znacznej części obszaru badań. Na podstawie analizy map można twierdzić, że na zbadanym obszarze do głębokości kilku metrów występują utwory o małych przewodnościach (wysokooporowe), a poniżej utwory o wyraźnie większej przewodności (niskooporowe). Utwory wysokooporowe można identyfikować z piaskami górnego kompleksu osadów czwartorzędowych, a niskooporowe – z mułkami stanowiącymi kompleks środkowy. Występowanie – na wykresach i mapach σ_a – stref dużych i małych wartości przewodności pozornej (N1, W1, N2 – Fig. 2) związane jest najprawdopodobniej z rzeźbą stropu utworów niskooporowych (mułków), co równoznaczne jest ze zmianami miąższości warstwy wyżej leżących, wysokooporowych piasków. Wzrost miąższości tych piasków zaznacza się strefami obniżonych wartości przewodności pozornej (np. W1). W miejscach, w których strop utworów niskooporowych podścielających piaski leży płycej, obserwowane są podwyższone wartości σ_a (strefy N1 i N2). Można przyjąć, że strefa W1 odpowiada zagłębieniu w stropie mułków, które wypełnione jest piaskami. Należy zwrócić uwagę na to, że na przedłużeniu osi tej struktury, w kierunku NNE, w skarpie osuwiska widoczna była rynnowa forma określana przez geologów jako „stromoboczne koryto” (Galaś & Paulo 2006) oraz obserwowano wycieki wody. Powierzchniowy zasięg tej struktury (W1) może być oceniony na podstawie map przewodności pozornej (Fig. 2). W północnej części zbadanego obszaru ma ona charakter rynny o długości 50–60 m z wyraźnie zaznaczonymi krawędziami. Dalej na południe, na profilu P3, zaznacza się dobrze tylko wschodnia krawędź koryta – granica pomiędzy strefami W1 i N1. Ma ona południkowy przebieg.

Na podstawie profilowań indukcyjnych można było sądzić, że wspomniana strefa wysokooporowa W1 jest, w kontekście rozwiązywanego zadania, strukturą najbardziej interesującą. Może ona bowiem stanowić potencjalną drogę zasilania wycieków wody rejestrowanych na osuwisku.

W dalszym etapie badań w celu dokładniejszej, ilościowej charakterystyki ośrodka geologicznego wykonano ciąg sondowań elektrooporowych wzdłuż profilu P1. W wyniku ilościowej interpretacji dla każdego sondowania uzyskano głębokościowy profil geoelektryczny. W formie przykładu, na figurze 3, przedstawiony jest wynik interpretacji sondowania s03 zlokalizowanego w strefie W1. Poszczególnym warstwom występującym w profilu przypisano, w oparciu o wyinterpretowane wartości oporności, prawdopodobny charakter litologiczny – wyodrębniono utwory identyfikowane z kompleksami czwartorzędowymi: górnym (piaszczystym) i środkowym (mułki, ły) oraz podłoże podczwartorzędowe (diabazy lub wapienie). Warto przy okazji wspomnieć, że warunki pomiarowe dla metody elektrooporowej były trudne z uwagi na nadzwyczaj suchą glebę w miejscu badań (wielkie opory uziemień elektrod pomiarowych, liczne niejednorodności przypowierzchniowe). Ich skut-

kiem były stosunkowo duże „błędy” pomiarowe mające istotne znaczenie w późniejszej interpretacji zarówno sondowań, jak i tomografii elektrooporowej.



Rys. 3. Przykład interpretacji krzywej sondowania: A) krzywa polowa s03 i krzywa teoretyczna; B) ekwiwalentne modele interpretacyjne, 5-warstwowe; 1 – interpretacja „standardowa”; $\varepsilon = 5.62\%$ – średni błąd kwadratowy interpretacji, 2 – model z maksymalną wartością ρ_4 ; $\varepsilon = 6.14\%$, 3 – model z minimalną wartością H_3 ; $\varepsilon = 6.14\%$; C) model uznany za najbardziej prawdopodobny wraz z interpretacją litologiczną

Fig. 3. An example of DC resistivity sounding curve interpretation: A) field curve s03 and calculated, model curve; B) equivalent 5-layer interpretation models: 1 – “normal” model; $\varepsilon = 5.62\%$ – r.m.s error of interpretation, 2 – model with max. ρ_4 ; $\varepsilon = 6.14\%$, 3 – model with min. H_3 ; $\varepsilon = 6.14\%$; C) the most probable model with lithological interpretation

Kwestia interpretacji ilościowej wymaga choćby krótkiego wyjaśnienia. Interpretacja krzywych sondowań (tzw. zadanie odwrotne) obarczona jest niejednoznacznością związaną z występowaniem zjawiska ekwiwalencji (Koefted 1979). Przejawia się ono tym, że jednej krzywej polowej można przyporządkować wiele modeli interpretacyjnych (różnych zarówno co do ilości warstw, jak i ich oporności oraz miąższości), przy zachowaniu błędu dopasowania krzywej modelowej do polowej na zbliżonym poziomie. W ograniczaniu tej niejednoznaczności pomocne jest posiadanie informacji o rzeczywistej, *in situ*, oporności poszczególnych rodzajów badanych skał. W omawianym przypadku, nie mając takich danych, przy wyborze ostatecznego modelu uwzględniano uwarunkowania geologiczne określone na podstawie badań osuwiska i jego otoczenia (typy litologiczne skał, ich wzajemne ułożenie). Ponadto stosowano przy interpretacji zasadę doboru modelu zawierającego możliwie najmniejszą ilość warstw. Niemniej, nawet przy takich ograniczeniach istnieje pewien przedział dopuszczalnych rozwiązań. Na figurze 3B przedstawiono przykład wariantowej interpretacji. Jak widać, miąższość utworów wysokooporowych, identyfikowanych z piaskami górnego kompleksu czwartorzędowego, może wynosić od 6 do 9.5 m. Ostatecznie na podstawie wspomnianej analizy uwarunkowań geologicznych przyjęto, że najbardziej prawdopodobny jest profil głębokościowy przedstawiony na figurze 3C.

Profile głębokościowe, uzyskane z interpretacji ilościowej sondowań, zestawiono w przekrój geoelektryczny wzdłuż profilu P1 (Fig. 4C) (pokazano wyniki dotyczące jedynie przypowierzchniowej części ośrodka – do głębokości ok. 20–30 m). Dodatkowo na potrzeby analizy jakościowej sporządzono również tzw. przekrój oporności pozornej (Fig. 4B). Dane te uzupełniono wykresami profilowań indukcyjnych (Fig. 4A). Jak widać z zestawienia profili głębokościowych (Fig. 4C), struktura W1 wykryta profilowaniami indukcyjnymi odpowiada strefie przegłębienia w stropie utworów niskooporowych identyfikowanych z mułkami.

Na podstawie wykonanych sondowań elektrooporowych i profilowań indukcyjnych przekrój geoelektryczny charakterystyczny dla południowego przedpola wyrobiska kamieniołomu „Niedźwiedzia Góra” można opisać następująco:

- Przy powierzchni występują utwory o wysokich opornościach, sięgających kilku tysięcy Ωm . Można je identyfikować jako czyste, suche lub bardzo słabo zawilgocone piaski. Bezpośrednio przy powierzchni oporności tych piasków sięgają 5000 Ωm i więcej. Nieco głębiej oporności maleją, miejscami są o rząd mniejsze, co sugeruje, że piaski te mogą być zawodnione. Miąższość tych utworów zmienia się od ok. 1.5 m do kilku (lokalnie być może kilkunastu) metrów. W miejscach sondowań s02 i s03 ich miąższość jest największa. Stopnia odwodnienia nie można bliżej określić, bowiem w tym przypadku warstwa wodonośna ma oporności pośrednie między wysokooporowym nadkładem a niskooporowym podłożem (w odniesieniu do sondowań mamy tu do czynienia z krzywymi typu Q, tzn. oporność kolejnych warstw, od powierzchni terenu licząc, jest coraz mniejsza – jest to sytuacja niekorzystna z punktu widzenia interpretacji ilościowej).
- Poniżej piasków zalegają utwory o niskich opornościach 17–25 Ωm (sprowadycznie więcej). Takie wartości oporności mogą wskazywać na to, że są to wilgotne mułki lub utwory podobne. Miąższość tych utworów może przekraczać 40 m. Odpowiadają one środkowemu kompleksowi utworów czwartorzędowych. Prawdopodobny przebieg ich stropu został zaznaczony na przekroju linią przerywaną (Fig. 4C).
- Na znacznych głębokościach, rzędu kilkudziesięciu metrów p.p.t., sondowaniami elektrooporowymi rejestrowane są utwory o większych opornościach, stanowiące skonsolidowane podłoże czwartorzędu (mogą to być wapienie albo diabazy).
- Na wschód od strefy N1 na wszystkich profilach indukcyjnych obserwuje się gwałtowny spadek mierzonej przewodności (wzrost oporności) pozornej. Może to efekt pochodzący od następnej struktury rynnowej wypełnionej piaskami lub może to świadczyć o zanikaniu (wyklinowywaniu się) utworów mułkowych. W tym ostatnim przypadku pod niezbyt grubym, piaszczystym czwartorzędem może występować bezpośrednio podłoże skonsolidowane (diabazy, wapienie?). Wyjaśnienie tej kwestii wymagałoby rozszerzenia obszaru badań w kierunku wschodnim.

W celu szczegółowego rozpoznania strefy wysokooporowej W1 – identyfikowanej z rynnowym, wypełnionym piaskami, zagłębieniem w stropie mułków – przeprowadzono badania metodą tomografii elektrooporowej na fragmencie profilu P1 (wykonane one zostały dwa miesiące po badaniach indukcyjnych). Podobnie jak w przypadku sondowań elektrooporowych, również interpretacja badań ERT jest niejednoznaczna (Loke 2003).

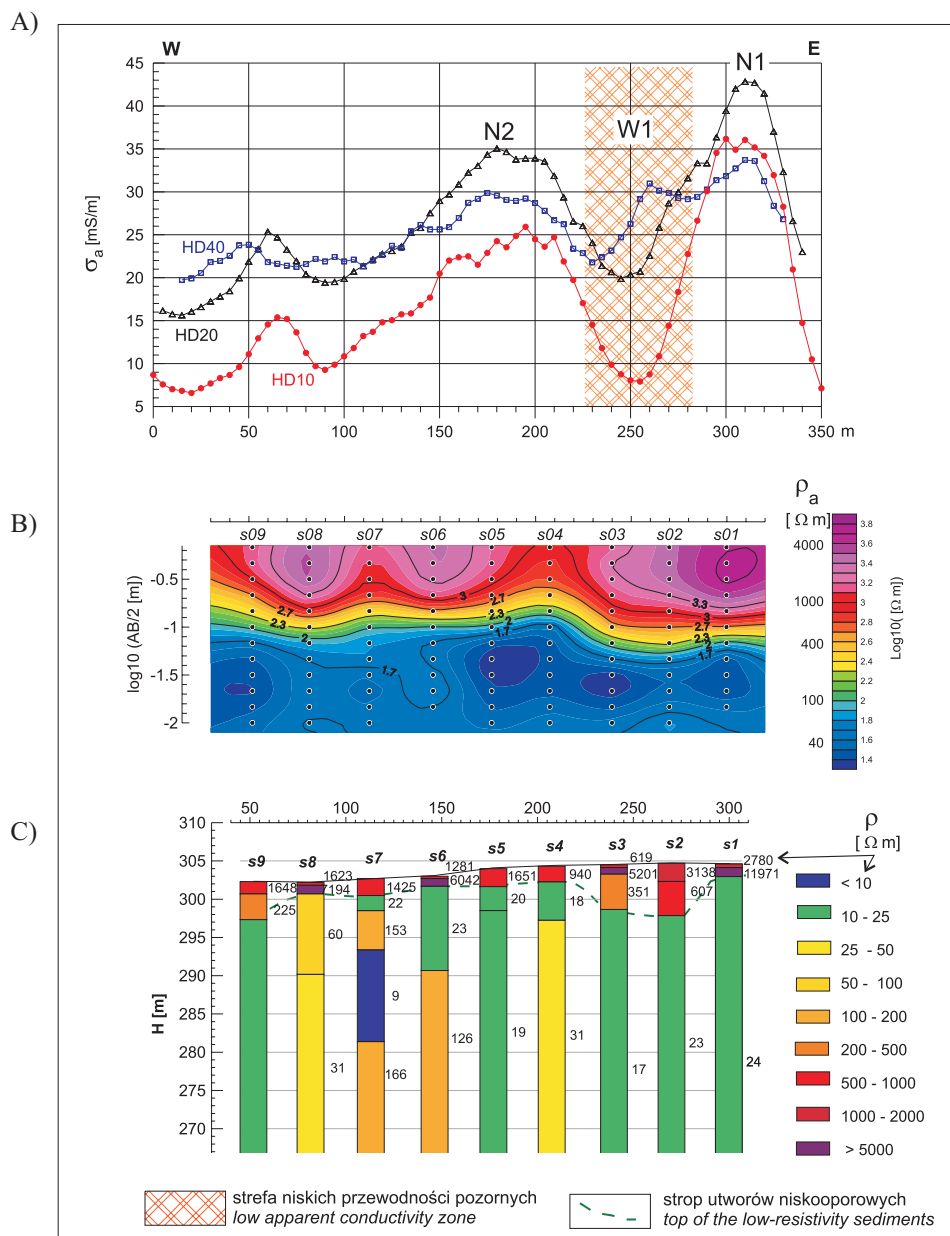


Fig. 4. Zestawienie wyników profilowań indukcyjnych i sondowań elektrooporowych dla profilu P1: A) wykresy profilowania indukcyjnego; B) przekrój oporności pozornej z sondowań elektrooporowych; C) interpretacja ilościowa sondowań elektrooporowych

Fig. 4. Joint interpretation of EM profiling and DC resistivity soundings data for line P1: A) results of EM profiling; B) apparent resistivity pseudosection based on DC resistivity soundings; C) results of DC resistivity soundings interpretation

Zależnie od zastosowanej metody interpretacji wyniki – przekroje 2D obrazujące rozkład oporności z głębokością – mogą w szczegółach różnić się między sobą. Przykład różnych modeli interpretacyjnych pokazany jest na figurze 5. Poziom średniokwadratowego błędu interpretacji był w przedstawionych przypadkach podobny i dość znaczny (dochodził do 30%), co wynikało ze wspomnianych wcześniej trudności pomiarowych (lokalne, wielkie opory uziemień). Zwiększało to oczywiście zakres rozwiązań ekwiwalentnych.

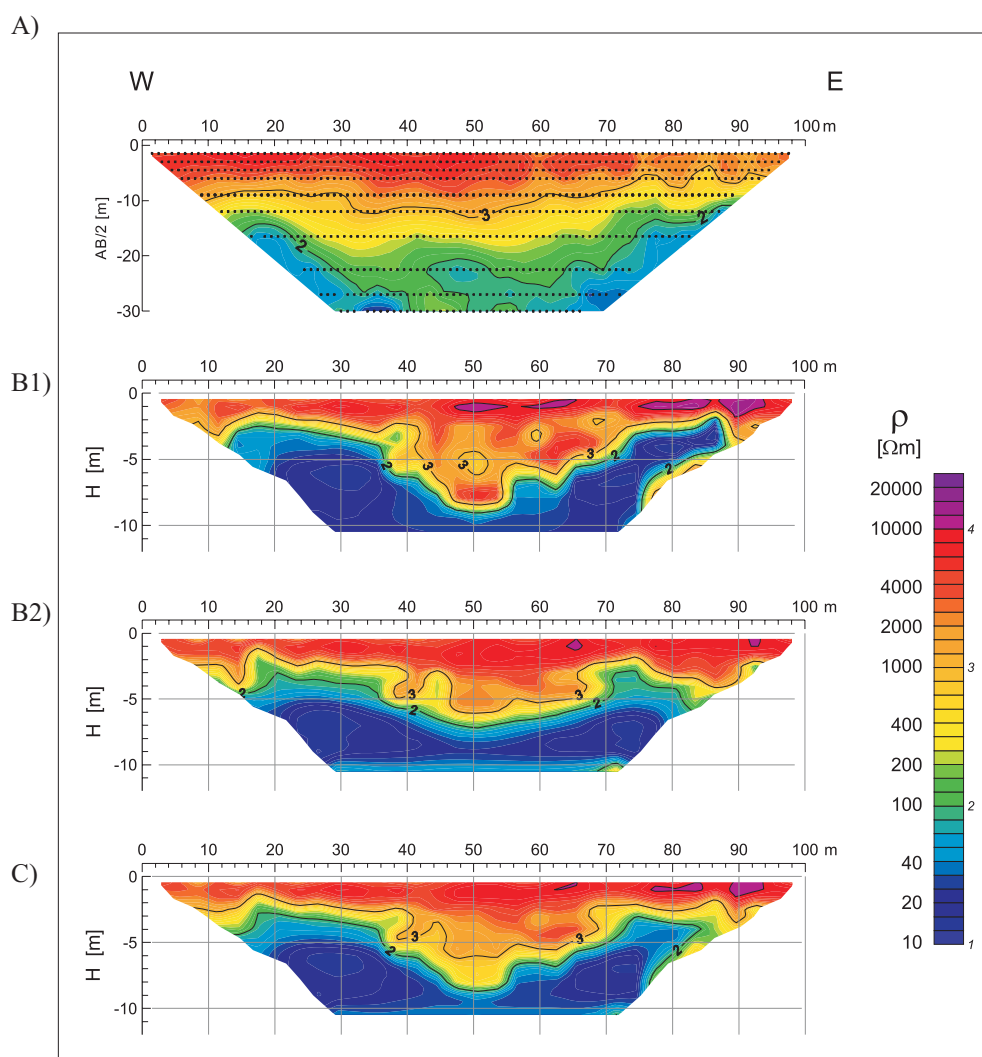


Fig. 5. Wyniki badań metodą tomografii elektrooporowej (*resistivity imaging*): A) przekrój oporności pozornej; B1), B2) przykłady wyinterpretowanych modeli 2D; C) model interpretacyjny ostateczny

Fig. 5. Results of earth resistivity tomography research: A) apparent resistivity pseudosection; B1), B2) examples of inversion models; C) final accepted inversion model

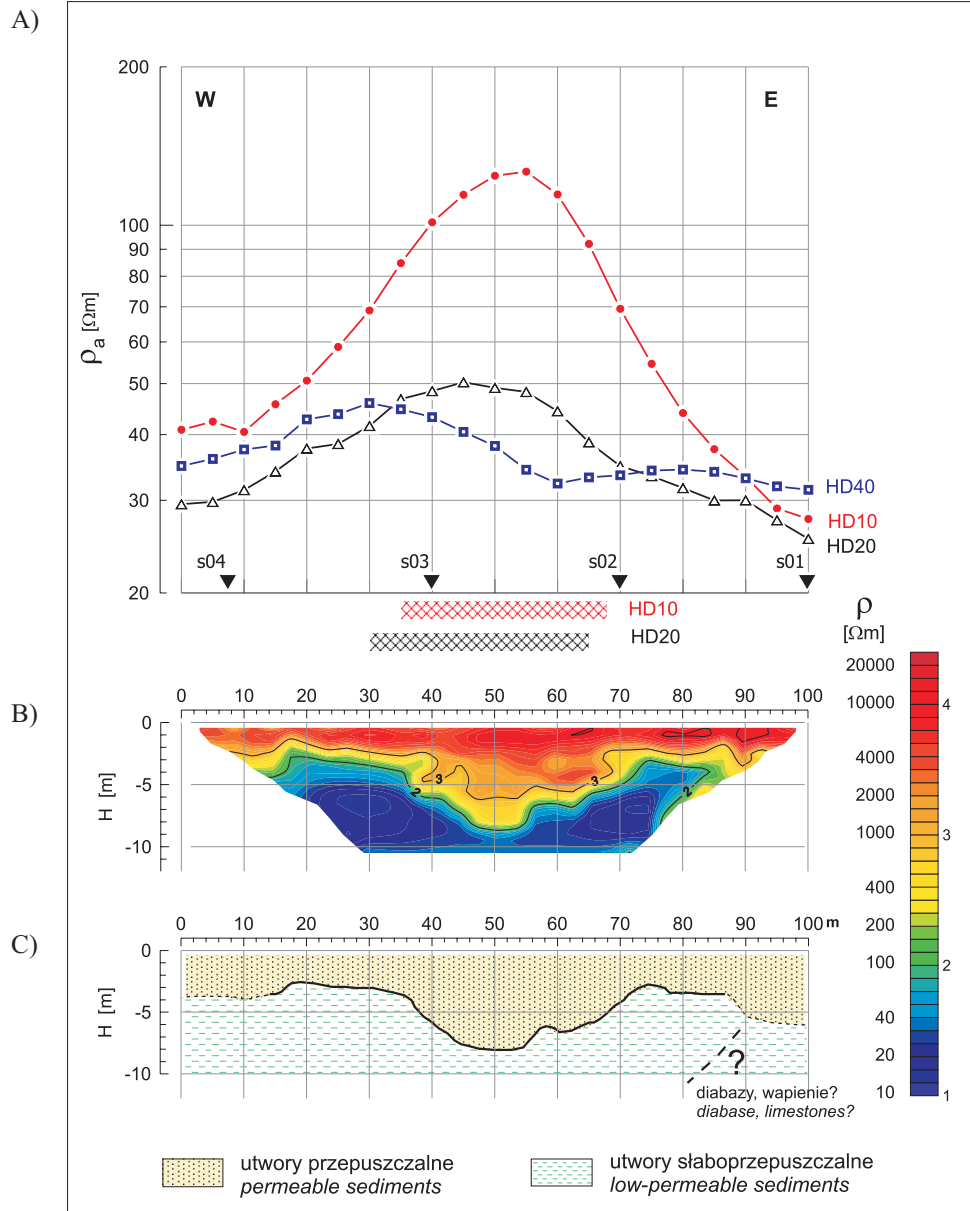


Fig. 6. Interpretacja strefy wysokooporowej wykrytej na profilu P1: A) wykresy profilowania indukcyjnego; poniżej zaznaczono wyinterpretowaną szerokość tej strefy; B) ostateczny model interpretacyjny z tomografii elektrooporowej; C) zgeneralizowana, geologiczna interpretacja danych tomograficznych

Fig. 6. Final interpretation of the trough discovered in the line P1: A) EM profiles with trough width marked under the graph; B) ERT inversion model; C) generalized interpretation of the ERT inversion model in geological terms

Mimo widocznych różnic modele te posiadają jednak wspólne cechy umożliwiające wnioskowanie o budowie geologicznej. Widać, że na odcinku między 40. a 70. metrem profilu występuje wyraźne przegłębienie w stropie utworów niskooporowych. Po analizie różnych możliwych rozwiązań jako najbardziej prawdopodobny przyjęto model uśredniony z kilku modeli ekwiwalentnych cechujących się najmniejszym błędem interpretacji (rzędu 20%). Model ten przedstawiony jest na figurze 5C. Dla tego modelu został następnie wyznaczony – na podstawie wyników obliczeń maksymalnego gradientu zmian wyinterpretowanej oporności (opcja programu RES2DINV) – prawdopodobny przebieg stropu utworów niskooporowych. Rezultaty interpretacji badań ERT, uzupełnione fragmentem krzywych profilowań indukcyjnych, przedstawione są na figurze 6. Pod krzywymi profilowań indukcyjnych zaznaczono szrafurą wyinterpretowany na ich podstawie zasięg występowania struktury rynnowej.

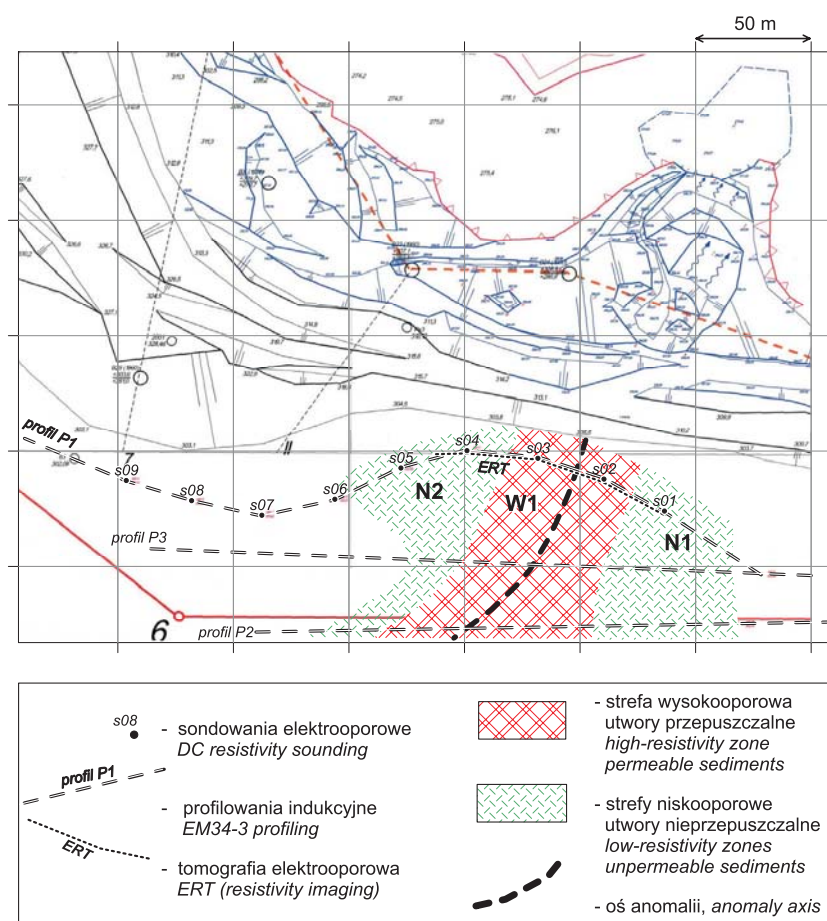


Fig. 7. Mapa wynikowa badań geoelektrycznych

Fig. 7. Map with the final interpretation of geoelectrical data

Z badań metodą tomografii wynika, że struktura rynnowa, którą mogą płynąć wody zasilające wycieki na osuwisku, ma w tym miejscu szerokość dochodząca do 30–35 metrów. W swojej środkowej części może ona mieć charakter przegłębionego koryta o stromej wschodniej krawędzi. Dodatkowo można – na podstawie wzajemnego położenia krzywych profilowań indukcyjnych (Fig. 6A – przesunięcie wykresu dla HD40 względem pozostałych) – zauważyć, że budowa geologiczna może być bardziej skomplikowana, niż jest to widoczne na przekroju 2D (Fig. 6C).

Jeszcze bardziej szczegółowe rozpoznanie ośrodka, a między innymi precyzyjne określenie poziomu wodonośnego, byłoby możliwe z wykorzystaniem geoelektrycznych badań penetracyjnych (Antoniuk & Mościcki 1994). Umożliwiają one również wydzielenie w profilu pionowym nawet bardzo drobnych warstw różniących się zawartością frakcji ilastej. Wykonanie takich badań chociaż na jednym stanowisku umożliwiłoby pełniejszą analizę badań powierzchniowych, zwłaszcza w kontekście określenia stosunków głębokościowych między poszczególnymi warstwami geologicznymi.

PODSUMOWANIE

Wyniki badań geoelektrycznych dostarczyły danych, na podstawie których możliwe było określenie hydrogeologicznych uwarunkowań rozwoju osuwiska w Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra”.

Osuwisko wraz z towarzyszącymi mu wypływami wody powstało na przedłużeniu formy geologicznej mającej – jak wynika z danych geofizycznych – charakter rynny o przebiegu SW-NE (Fig. 7). W ścianie niszy osuwiska dno tej struktury znajduje się na wysokości około 293 m n.p.m. Z interpretacji badań elektrooporowych wynika, że na południe od nasypu drogowego, w odległości 60–100 m od niszy, podnosi się ono do wysokości około 298 m. Z analizy profilowań indukcyjnych można sądzić, że opisywana struktura rynnowa w kierunku południowym przechodzi w formę bardziej rozbudowaną powierzchniowo, mającą charakter raczej rozczłonkowanego basenu niż doliny. Jest to teren, z którego następuje doprowadzenie, wspomnianym, dominującym korytem, wód w rejon południowej skarpy wyrobiska, co warunkuje rozwój i dalsze zachowanie się osuwiska.

Badania geoelektryczne – profilowania indukcyjne, sondowania elektrooporowe i tomografia elektrooporowa – zastosowane w przedstawionej, odpowiedniej w metodyce sekwencji, okazały się bardzo przydatne do rozpoznania płytkiej budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych w kontekście wyjaśnienia uwarunkowań powstania osuwiska w Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra”.

Artykuł przygotowano w ramach działalności statutowej – umowa AGH nr 11.11.140.06.

Praca była prezentowana na VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Geofizyka w Geologii, Górnictwie i Ochronie Środowiska” w dniu 27 października 2006 r. na WGGiOŚ AGH w Krakowie.

LITERATURA

- Antoniuk J. & Mościcki W.J., 1994. Metoda penetracyjnego profilowania oporności elektrycznej – przykłady zastosowań. *Przegląd Geologiczny*, 42, 10, 857–862.
- Antoniuk J. & Mościcki W.J., 1995. Rozwój i zastosowanie nowych metod geoelektrycznych w rozpoznawaniu migracji wód zmineralizowanych w wodach podziemnych. *VII Konferencja Sozologiczna „Problemy ochrony środowiska wokół składowiska odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”*, Polkowice 11–12 V 1995, 77–88.
- Antoniuk J. & Mościcki W.J., 1996. Badania stanu środowiska hydrogeologicznego wokół ognisk skażeń chemicznych przy pomocy metod geoelektrycznych. W: Ciężkowski W. & Ossowski J. (red.), *Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski*, Wrocław 1996, 229–237.
- Antoniuk J., Mościcki W.J. & Skórzak A., 2004. Zastosowanie metod geoelektrycznych do rozpoznawania budowy geologicznej i zawodnienia utworów występujących w zakładzie złoża węgla brunatnego – przykład z KWB „Bełchatów”. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. Miesięcznik WUG*, 5(117), 2004, 16–17.
- Dahlin T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 7, 275–283.
- Gałaś A. & Paulo A., 2006. Osuwisko w Kopalni Diabazu „Niedźwiedzia Góra” koło Krzeszowic w świetle badań geologicznych i geofizycznych. *Kwart. AGH Geologia* (w przygotowaniu do druku).
- Koefoed O., 1979. *Geosounding principles, 1. Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York.
- Loke H., 2003. Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method. *Geotomo Software, Manual*, 122.
- McNeill D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Technical note TN-6, Geonics Ltd*, Toronto.
- Mościcki W.J. & Antoniuk J., 1999. Metoda obrazowania elektrooporowego (resistivity imaging). Przykład badań dla celów geologiczno-inżynierskich. *Materiały V Konf. N.-T. „Geofizyka w Geologii, Górnictwie i Ochronie Środowiska”*, Kraków 23.06.1999, 315–325.
- Rutkowski J., Zuchiewicz W., Bluszcz A. & Helios-Rybicka E., 1998. Lithology of glacial sediments of Safian-2 (Elsterian-2) stage in Tenczynek Basin, Kraków region, Southern Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 68, 247–265.
- Rutkowski J., Zuchiewicz W., Helios-Rybicka E. & Bluszcz A., 1994. Nowe dane o utworach glacialimnicznych w Niedźwiedziej Górze koło Krzeszowic. *Spraw. z Pos. Kom. Nauk. PAN Oddz. Krak.*, 37 (1), 221–222.
- Rutkowski J., Zuchiewicz W. & Hoffmann M., 1993. Uwagi o utworach zlodowacenia Sanu w Niedźwiedziej Górze koło Krzeszowic. *Spraw. z Pos. Kom. Nauk. PAN Oddz. Krak.*, 35 (1–2): 293–295.

Summary

In the “Niedźwiedzia Góra” Diabase Quarry located near Krzeszowice (south of Poland), a big landslide occurred in the late spring 2005. The event took place in Quaternary deposits forming the south scarp of the pit. Direct reasons of that event were massive rain-falls in the region. To protect pit quickly and properly there was an urgent need to explain the genesis of the landslide. A detailed geological survey was performed in the landslide. In the same time, geophysical survey was undertaken. The target was to reveal the shallow geology of the southern foreland of the quarry and collect some information about underground water circulation. Geoelectric methods were applied: electromagnetic profiling with EM34-3 Geonics equipment (horizontal dipole configuration with 5 m profiling step), DC resistivity soundings (Schlumberger array with max. spacing $AB/2 = 100$ m) and earth resistivity tomography (ERT) (with Wenner array and $a = 1$ m minimum spacing). Location of the geophysical survey lines is given in Figure 1. At the first stage, EM profiling was performed in three survey lines P1, P2 and P3. Distinct zones of higher and lower apparent conductivity were observed, especially in P1 line (Fig. 2A). These zones – W1, N1 and N2 – are well visible on apparent conductivity contours for all three arrays: HD10, HD20 and HD40 (Fig. 2B). Generally, high-conductivity anomalies are caused by silt/clay sediments while low-conductivity ones by sands. Therefore, by comparing all maps it is possible to find the space distribution of water permeable and impermeable sediments. Low-conductivity pattern W1 can be interpreted as an erosion trough cut off in silt sediments. The trough is probably of glacial origin, and is filled with clean sands and can bear underground water. To learn more about depth relations between geological strata in the region, ten DC resistivity soundings were made along line P1. Although there was strong equivalence in sounding curves interpretation due to the Q-type of geoelectrical section (Fig. 3) it was possible to construct quantitative geoelectrical cross-section along P1 line (Fig. 4). Here, the depth of the trough can be estimated to 6–10 m. For more precise estimation of the centre and shape of the W1 structure, the earth resistivity tomography was applied at a most interesting part of the line P1. Several models of ERT data inversion were analyzed (Fig. 5). Finally, it can be stated that the trough is about 30 m wide and may be about 8 m deep in the central part (Fig. 6). The bottom of the trough rests at the altitude of 298 m a.s.l. while water out-flow occurrences on the landslide were observed at the altitude of 293 m. Therefore, it is very probable that the discovered trough supplied an unusual amount of underground water to the pit what triggered the landslide. Surface position of the trough in relation to the pit and landslide is given in Figure 7. Geoelectrical methods applied in proper way and in adequate sequence proved very useful in explaining the genesis of the landslide.