

Zastosowanie metod geofizycznych do rozpoznania dolin kopalnych

Szymon Ostrowski¹



Application of near-surface geophysics for surveying buried valleys. *Prz. Geol.*, 72: 125–131; doi: 10.7306/2024.62

Abstract. Between 2020 and 2023, the Polish Geological Institute – NRI, acting as Polish Geological Survey conducted project Complex geophysical survey of selected buried valleys. Genetic, spatial and raw material deposit aspects. The project aimed at reaching three main goals: (i) surveying four selected valleys with a dense network of geophysical surveys; (ii) estimation of the potential of placer deposits of raw materials in coarse detrital sediments of the valleys' infill, especially in the glacial setting of northern Poland; and (iii) optimization of the arsenal of geophysical methods and workflow for a fast survey of buried and overdeepened valleys. The survey revealed huge diversity in the geometry and genesis of the valleys – from overdeepened valleys that are migrating laterally, to vertically stacked valleys. The glacetectonic and tectonic setting seems to have great impact on the valley development and evolution. The placer deposit potential, especially in the valley located in north-eastern Poland is estimated as negligible or non-existent. The heavy mineral concentrate obtained by gravitational methods constitute much less than 0.1% of the sample mass and is composed mostly of garnet and iron oxides. In southern Poland, the concentration of heavy mineral is slightly higher, and iron oxide minerals prevail. The experience gained during implementation of the project allows for suggesting an optimal survey workflow for the investigation of buried valleys. The survey should be stage-planned, with the preliminary stage concentrating on covering the area with electrical resistivity or electromagnetism soundings. Such measurements produce a preliminary resistivity model that allows for recognition of the spatial extent of the (usually high resistivity) valley infill. The second stage based on more accurate 2D seismic and/or electric resistivity tomography should be planned on the basis of the results of the preliminary stage.

Keywords: Tunnel valley, buried valley, engineering geophysics, seismic refraction tomography

W latach 2020–2023, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) zrealizował zadanie *Kompleksowe, geofizyczne rozpoznanie wybranych dolin kopalnych na terenie Polski w aspekcie genetycznym, przestrzennym i złożowym*, polegające na kompleksowym rozpoznaniu wybranych dolin kopalnych na terenie Polski w wyżej wymienionych aspektach za pomocą metod geofizycznych. Konieczność prowadzenia rozpoznania takich struktur w nadchodzących latach będzie prawdopodobnie wzrastała z kilku powodów, z których najważniejszym jest zaopatrzenie w wodę do celów komunalnych i rolniczych. W całej Polsce tego typu formy mogą stanowić istotne lokalne zbiorniki wód podziemnych o dobrej izolacji (np. Mikołajków, Jóźwiak, 2002). Obecnie część z nich jest rozpoznana za pomocą wierceń oraz prostych badań elektroporowych i są one wykorzystywane jako lokalnie istotne poziomy wodonośne. Zjawiskiem, które może wpłynąć na konieczność szybkiego rozpoznania kompleksowej budowy geologicznej dolin kopalnych, jest również to, że jako obiekty o wypełnieniach w przewodzie piaszczystych mogą stanowić potencjalne drogi migracji zanieczyszczeń antropogenicznych.

W rejonach przedgórskich (przede wszystkim na obszarze przedsubdeckim) w osadach dolinnych notuje się koncentracje minerałów ciężkich, takich jak cyrkon czy złoto rodzime (Wojciechowski, 1994; Przybylski i in., 1998; Wierchowicz, 2002; Urbański, 2010). Wojciechowski (1994) wykazał, że takie koncentracje mogą mieć znaczenie ekonomiczne. Potencjał złożowy koncentracji minerałów ciężkich w formach dolinnych występujących w centralnej i północnej Polsce jest do tej pory właściwie nieznan. Z dolinami kopalnymi są również związane złoża kopalni pospolitych, przede wszystkim złoża piasków i żwirów.

Z jednej strony złoża tych kopalni mogą być obiektem zainteresowania firm wydobywczych, z drugiej strony – ich intensywna eksploatacja może spowodować potencjalne zaburzenie stosunków hydrogeologicznych lub niebezpieczeństwo rozprzestrzenienia się zanieczyszczeń w tych ważnych gospodarczo zbiornikach wód podziemnych.

Tymczasem, pomimo że w trakcie analiz map geologicznych z terenu Polski centralnej i północnej często napotymano występowanie kopalnych form dolinnych (szczególnie pod przykryciem młodszych osadów glacialnych), ich rozprzestrzenienie nie jest dokładnie znane, a ich rozpoznanie geologiczne było prowadzone jedynie incydentalnie. Frydrych i Rdzany (2016) wspominają o ponad 200 glacialnych dolinach, tylko na obszarze zlodowaceń starszych od zlodowacenia wistły.

Zadanie miało trzy podstawowe cele. Pierwszy z nich dotyczył szczegółowego rozpoznania wyznaczonych do badań obiektów geologicznych za pomocą bezinwazyjnych metod badawczych z zakresu geofizyki inżynierskiej; drugi to wypracowanie metodyki badań kopalnych i pogrzebanych form dolinnych, natomiast trzeci dotyczył oceny lokalnych perspektyw złożowych związanych z badanymi formami.

W ramach pierwszego celu pozyskano informacje o geometrii form dolinnych i architekturze depozycyjnej, oraz pośrednio o wypełnieniu tych form. Zdobyte informacje wnoszą nowe spojrzenie na genezę poszczególnych obiektów, posłużyły do aktualizacji wiedzy na temat budowy geologicznej kraju oraz mogą być podstawą do prowadzenia analiz hydrogeologicznych, środowiskowych i złożowych.

Drugim celem zadania było wypracowanie optymalnej metodyki szybkiego, bezinwazyjnego, dokładnego i efek-

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; sost@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0003-2766-941X.

tywnego kosztowo rozpoznania geometrii podłoża, architektury depozycyjnej i litologii wypełnień kopalnych dolin o zróżnicowanej genezie. Doświadczenia zdobyte w trakcie realizacji zadania zarówno pozytywne, jak i negatywne pomogą w przyszłości w optymalnym planowaniu badań dla podobnych obiektów.

Trzecim celem zadania była ocena potencjału występowania koncentracji minerałów ciężkich mogących mieć znaczenie gospodarcze, określenia składu mineralogicznego i chemicznego koncentratu oraz jakościowa ocena koncentracji minerałów ciężkich. Wcześniejsze prace nad koncentracjami minerałów ciężkich w złożach okruszowych koncentrowały się głównie na złocie. Obecnie, przy implementacji *Critical Raw Materials Act* (CRMA), znaczenia nabierają również koncentracje innych metali, np. hafnu, skandiu czy tytanu. Celem zadania była weryfikacja wcześniejszych informacji na temat koncentracji minerałów frakcji ciężkiej w dolinie przedsudeckiej (dolina Nysy Szalonej i Kaczawy) oraz wstępne rozpoznanie dla jednej doliny w północnej Polsce (badania wykonano w dolinie Rospudy).

METODYKA

Wybór obiektów badań

Badaniami objęto 4 lokalizacje o charakterze dolin kopalnych. W założeniu obiekty były zróżnicowane pod względem pogrzebienia (doliny pogrzebane i niepogrzebane), genezy (doliny o charakterze rynien subglacjalnych i doliny o genezie rzecznej), wieku (obiekty powstałe w trakcie ostatniego zlodowacenia i starszych), rozmieszczenia w obrębie kraju oraz względem głównych elementów geomorfologicznych. Wiele informacji o rozmieszczeniu dolin kopalnych w obrębie zasięgu starszych zlodowaceń uzyskano z analizy danych literaturowych (Rdzany i in., 2015, 2018; Frydrych, Rdzany, 2016). Dla dolin sudeckich wstępne informacje uzyskano z pracy Michniewicza i in. (1996), a dla wschodniej części Sudetów – z pracy Przybylskiego i in. (1998). Aspekty złożowe dotyczące złóż okruszowych w rzekach przedsudeckich porusza Wojciechowski (1994). Dla Lubelszczyzny i Roztocza obserwacje dotyczące rozwoju form dolinnych zaczerpnięto z pracy Brzezińskiej-Wójcik i Kociuby (2001), a dla Wyżyny Woźnicko-Wieluńskiej z pracy Szuberta (2012). Dla całego obszaru Polski, a szczególnie dla obszaru objętego ostatnim zlodowaceniem, niezmiernie ważnym źródłem informacji była *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000* (SMGP).

W trakcie wstępnych selekcji zaznaczyła się prawidłowość łącząca występowanie dolin kopalnych o genezie glacialnej z występowaniem form sedimentacji szczelinowej (szczególnie ozów), nawet w przypadku dolin pogrzebanych. We wstępnej identyfikacji interesujących obiektów badawczych był przydatny katalog ozów (Czarnicka-Chodkowska, 1991).

Archiwalne dane z wierceń i sondowań elektrooporowych uzyskano z Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG) oraz Centralnej Bazy Danych Hydrogeologicznych (CBDH). Zestawienie tych danych pozwoliło na przybliżone wyznaczenie zasięgu form, lub rezygnację z rozważanych lokalizacji.

W efekcie wyznaczono cztery poligony badawcze (ryc. 1).

Zastosowana metodyka badań

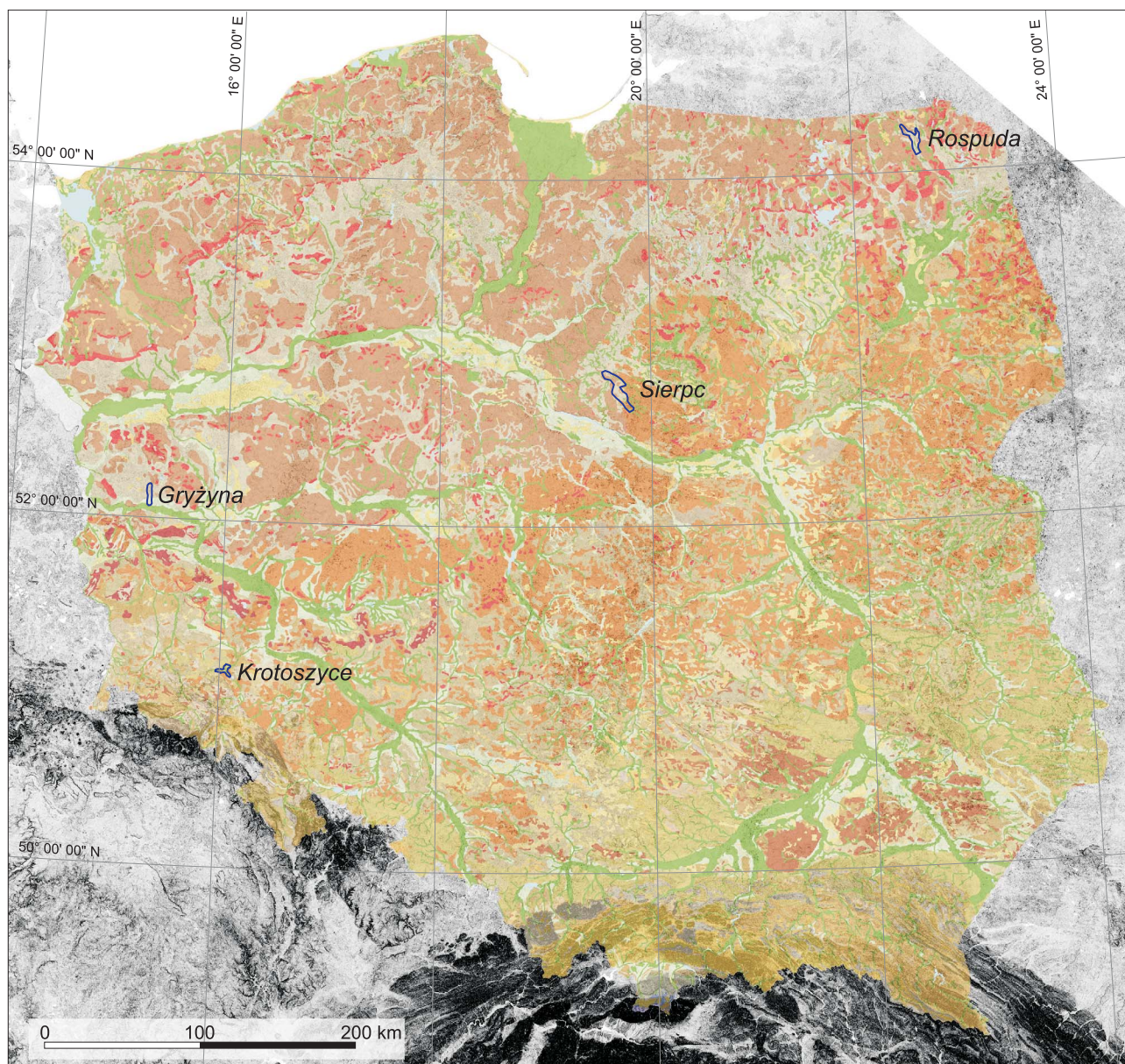
Rozpoznanie dolin kopalnych oparto przede wszystkim na gęsto rozmieszczonych geofizycznych badaniach profilowych. Linie pomiarowe przecinały poligony badawcze prostopadle do dłuższej osi zidentyfikowanych dolin. Takie ich rozmieszczenie pozwoliło na optymalne rozpoznanie geofizyczne tych obiektów geologicznych. Określono, że linie badawcze powinny być rozmieszczone w przybliżeniu co 1–2 km i w miarę możliwości przecinać całe badane poligony badawcze, tak aby krańce uzyskanych przekrojów geofizycznych wychodziły poza krawędzie poszczególnych dolin i rejestrowały parametry w ośrodku geologicznym, w którym doliny te były wyerodowane. Badania profilowe wykonano technikami geofizyki inżynierskiej (Ostrowski i in., 2023), co pozwoliło na uzyskanie pionowych przekrojów parametrów geofizycznych w podłożu, które wraz z innymi danymi służą do przeprowadzenia interpretacji geologicznej.

W badaniach zastosowano wysokorozdzielcze badania sejsmiczne oparte przede wszystkim na technice sejsmicznej tomografii refrakcyjnej (SRT – *Seismic Refraction Tomography*), które pozwalają uzyskać przekroje pola prędkości fali P. W przypadkach, gdy było to możliwe, połowe dane sejsmiczne przetworzono metodą głębokościowych punktów wspólnych (badania sejsmiki refleksyjnej), uzyskując refleksyjne sekcje sejsmiczne. Pozwalają one obrazować położenie granic geologicznych w podłożu.

Drugą zastosowaną techniką była technika tomografii elektrooporowej (ERT – *Electrical Resistivity Tomography*), która pozwala na uzyskanie przekrojów pola oporności elektrycznej ośrodka geologicznego – parametru silnie powiązanego z litologią. Badania również wykonano w układzie gwarantującym wysoką rozdzielczość uzyskanych wyników.

Jako uzupełnienie badań liniowych (profilowych) mogą zostać wykonane rozproszone badania punktowe w postaci sondowań geofizycznych. Badania takie pozwalają na uzyskanie jednowymiarowego, pionowego profilu parametrów. Badania punktowe wykonane w wystarczającym zagęszczeniu przestrzennym można potraktować jako źródło miarodajnych, średnich wartości parametrów geofizycznych. Interpolacja w przestrzeni trójwymiarowej tych wartości pozwala na uzyskanie obrazu (modelu) generalnego rozkładu tych parametrów w przestrzeni. Należy jednak pamiętać, że badania punktowe z określonym zagęszczeniem przestrzennym nie pozwalają na wychwycenie zmienności o ograniczonym zasięgu, mniejszym niż połowa dystansu pomiędzy punktami sondowań. Dlatego badania punktowe posłużyły jedynie do określenia generalnego planu budowy badanych obiektów. Dla poligonów Gryżyna i Rospuda wykonano nowe badania z zastosowaniem sondowań elektromagnetycznych (TEM – *transient electromagnetics*), które pozwoliły uzyskać profile opornościowe, natomiast dla poligonów Krotoszyce i Sierpc, gdzie istniały liczne materiały archiwalne obejmujące sondowania elektrooporowe (VES – *Vertical Electrical Sounding*), wykonano nowe przetwarzanie danych pomiarowych sondowań archiwalnych. W obu przypadkach pozwoliło to skonstruować generalny model oporności ośrodka geologicznego.

Na podstawie analizy materiałów archiwalnych i literatury określono, że zasięg głębokościowy dolin w Polsce może dochodzić do 100 m, więc zasięg rozpoznania powi-



Ryc. 1. Lokalizacja poligonów badawczych na tle mapy geologicznej Polski (uproszczona *Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 500 000* (Marks i in., 2022); źródło danych: <https://geologia.pgi.gov.pl>)

Fig. 1. Location of the survey areas against *Geological Map of Poland 1 : 500 000* scale (Marks et al., 2022); data from: <https://geologia.pgi.gov.pl>

nien być zbliżony lub większy od tej wartości oraz powinny być odpowiednio dobrano techniki badawcze i parametry akwizycji.

W zadaniu uwzględniono wykonanie uzupełniających badań kartograficzno-złożowych, które miały na celu określenie zawartości minerałów ciężkich w osadach klastycznych wypełniających doliny oraz określenie ich składu mineralogicznego i chemicznego. Celem tych badań było wstępne określenie potencjału występowania złóż typu okrucowego. Próbkę pobierano w odsłonięciach naturalnych (głównie w skarpacech i w dnie potoków) oraz sztucznych (żwirownie i piaskownie). Próbki były pobierane i separowane ręcznie metodą szlichową. Uzyskany koncentrat został dodatkowo poddany separacji w cieczy ciężkiej i poddany analizie chemicznej metodą spektroskopii dyspersji energii EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Na tej podstawie określono skład mineralogiczny frakcji

ciężkiej. Ogółem pobrano 21 próbek z dwóch poligonów – Krotoszyce i Rospuda.

WYNIKI BADAŃ

W ramach realizacji zadania badaniami objęto cztery doliny, należące do dwóch odmiennych typów genetycznych. Dolina Kaczawy i Nysy Szalonej w obrębie poligonu badawczego Krotoszyce jest doliną o typowej genezie fluwialnej, natomiast pozostałe trzy poligony obejmują doliny typu rynnowego. Dla każdego z poligonów uzyskano rozległy materiał, który pozwolił na opracowanie modelu geologicznego danej doliny kopalnej. Poniżej zaprezentowano krótkie podsumowanie dla poszczególnych poligonów i wybrane wyniki ilustrujące nowe informacje o ich budowie geologicznej, uzyskane w wyniku realizacji zadania.

Poligon badawczy Krotoszyce

Dolina w rejonie Krotoszyce powstała w wyniku działania rzek przedgórskich, tuż u podnóża wynoszonego bloku sudeckiego. Jej wypełnienie ma najmniejszą miąższość ze wszystkich badanych obiektów. Przebieg poszczególnych odcinków oraz rozwój wypełnień aluwialnych był częściowo kontrolowany tektonicznie (ryc. 2). Badania wskazują na obecność stref uskokowych w podłożu, które pokrywają się z głównymi liniami przebiegu doliny. Zmiany miąższości wypełnienia również pokrywają się z przebiegiem linii tych uskoków. Na rozwój wypełnienia doliny wpłynął również lodowiec, wchodzący w jej obręb od północy – w osadach można zidentyfikować gliny zwałowe.

Pozostałe doliny powstały pierwotnie w wyniku działalności wód wypływających z lodowca. Powszechnie uważa się, że odwodnienie lodowca zachodzi w warunkach subglacialnych, a przepływ odbywa się pod wysokim ciśnieniem w strefie kontaktu lód–podłoże (Huuse, Lykke-Anderson, 2000; Van der Vegt i in., 2012). Gwałtowne przepływy przy wysokim gradiencie ciśnienia powodują intensywną erozję kształtującą głębokie rozcięcia. Pomimo wspólnej genezy trzech badanych dolin, w każdej z nich obserwuje się specyficzne cechy, które odzwierciedlają zmienność czynników kontrolujących ich rozwój.

Poligon badawczy Gryżyna

Dolina kopalna objęta poligonem badawczym Gryżyna wyraźnie zaznacza się we współczesnej morfologii. Przebiega ona prawie prostoliniowo i ma szerokość 1,5–2,0 km. W podłożu zaznaczają się intensywne deformacje glaciotektoniczne obejmujące przede wszystkim osady mioceneskie (ryc. 3). Na obszarze poligonu wykazano obecność co najmniej dwóch głębokich rozcięć erozyjnych o różnym wieku, które nakładają się na siebie w planie, przy czym starsza forma erozyjna sięga blisko 300 m p.p.t. (ryc. 4). W holocenie dolina kopalna została reaktywowana jako dolina rzeczna. Nakładanie się kolejnych generacji dolin o różnym wieku sugeruje ich uprzywilejowany przebieg, co jest prawdopodobnie związane z deformacjami glaciotektonicznymi występującymi w podłożu.

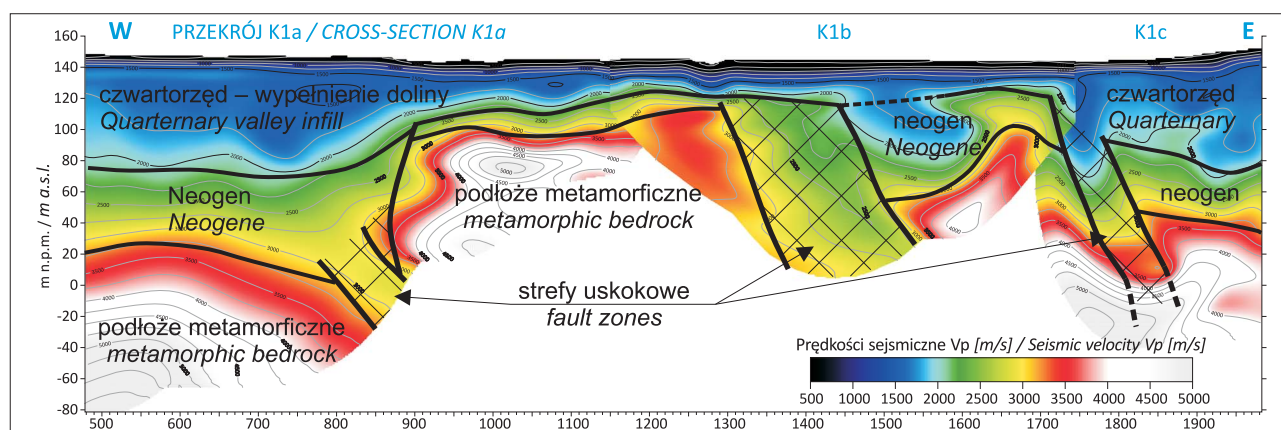
Poligon badawczy Rospuda

System dolin objęty poligonem badawczym Rospuda składa się z wielu nakładających się na siebie rynien, wcinających się w miąższe poziomy osadów glacialnych. Głębokość rozcięcia erozyjnego sięga ponad 100 m, a powstałe rynny wypełnione są osadami piaszczysto-żwirowymi z wkładkami ilów i glin. Kolejne generacje rozcięć erozyjnych nakładają się obocznie, a nie jak w przypadku poligonu Gryżyna – wertykalnie. Wskazuje to na zbliżony wiek poszczególnych rozcięć, co sugeruje bardzo wysoką dynamikę i intensywność zmian w obrębie czoła lądolodu.

Poligon badawczy Sierpc

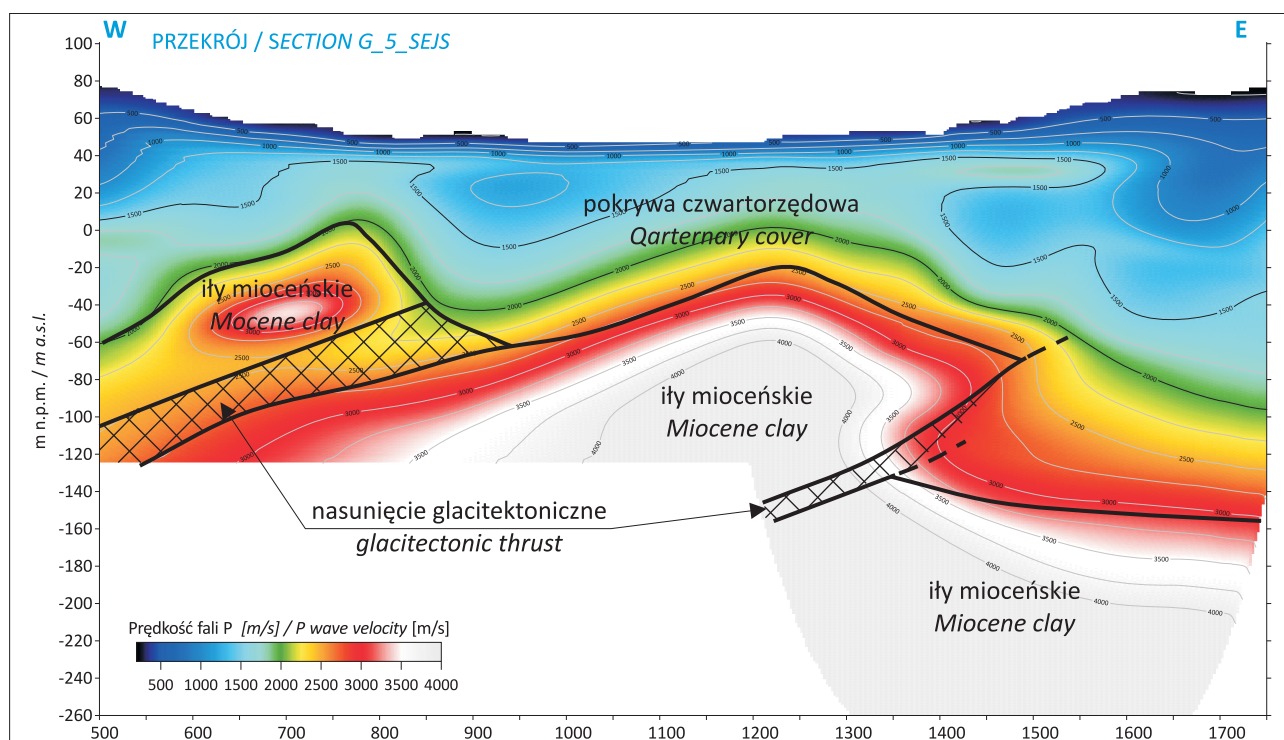
Dolina objęta poligonem badawczym Sierpc ma przebieg złożony z dwóch odcinków ułożonych względem siebie kulisowo. Formy te mają szerokość do ok. 2 km i są wypełnione przede wszystkim materiałem piaszczystym. Połączenie pomiędzy dwoma odcinkami odbywa się za pośrednictwem dwóch dodatkowych wąskich stref piaszczystych. Głębokość identyfikowanych rozcięć jest mniejsza niż wynikałoby z profili wierceń i tylko w wąskich strefach rozcięcia te obejmują prawie całą warstwę czwartorzędową. Kulisowy przebieg wąskich stref przecinających pakiet warstw czwartorzędowych nasuwa skojarzenia z kulisowym ułożeniem spękań charakterystycznym dla reżimu ścięciowego. Można spekulować, że rozwój dolin rynnowych miał związek ze strefą marginalną lądolodu, w rejonie gdzie lodowiec przemieszczał się skośnie do czoła. Taki ruch mógłby wygenerować w podłożu naprężenia ścinające, dające początki uprzywilejowanemu przepływowi.

Wstępna analiza dotycząca możliwości występowania złóż okrucuchowych została wykonana dla poligonów Krotoszyce i Rospuda. W żadnej z analizowanych próbek nie zidentyfikowano koncentracji minerałów ciężkich, które mogłyby być interesujące pod kątem złożowym czy mineralnym. Koncentracje minerałów ciężkich uzyskane prostymi metodami grawitacyjnymi wyniosły dla poligonu badawczego Krotoszyce średnio poniżej 0,02%, maksymalnie 0,035%. Dla próbek pobranych na poligonie badawczym Rospuda były jeszcze niższe i wyniosły poniżej



Ryc. 2. Zrąb podłoża metamorficznego na przekrojach K1a, K1b i K1c (fragment). Wyniesienia podłoża wyraźnie wpływają na geometrię wypełnienia doliny

Fig. 2. Horst of metamorphic bedrock underlying Quaternary valley sediments. Cross-sections K1a, K1b, K1c (fragment). The geometry of bedrock/sediment interface affects the valley infill



Ryc. 3. Elewacja ośrodka wysokoprędkościowego na przekroju G_5_SEIS (fragment) odpowiadająca zdeformowanym glacitektonicznie ilom mioceniśkim

Fig. 3. The glacitectonic deformations in high-velocity medium (Miocene clay) beneath. Cross-section G_5_SEIS (fragment)

0,01% wagowego. W składzie mineralnym frakcji ciężkiej z próbek pobranych na poligonie Krotoszyce przeważa magnetyt, który stanowi 30–40% objętości frakcji. Granaty i ilmenit występują w porównywalnych ilościach, rzędu kilkunastu procent. Sumarycznie tlenki żelaza stanowią ok. 50% objętości frakcji ciężkiej. Cyrkon stanowi jedynie kilka procent, a w jednej próbce dochodzi do 10%. Zanotowano pojedyncze ziarna monacytu, jedynie w jednej próbce zawartość tego minerału przekracza 1% objętości. W próbkach pobranych na poligonie Rospuda przeważają granaty, magnetyt i ilmenit występują w porównywalnych ilościach. Wspólnie te frakcje mineralne stanowią 65–80% objętości. Odnotowano występowanie pojedynczych ziaren monacytu, które dla niektórych próbek stanowią ok. 1% objętości frakcji minerałów ciężkich. Zawartość cyrkonu stanowi mniej niż 1% i występuje on tylko w niektórych próbkach.

PRZYDATNOŚĆ BADAŃ GEOFIZYCZNYCH DO ROZPOZNANIA DOLIN KOPALNYCH – DYSKUSJA

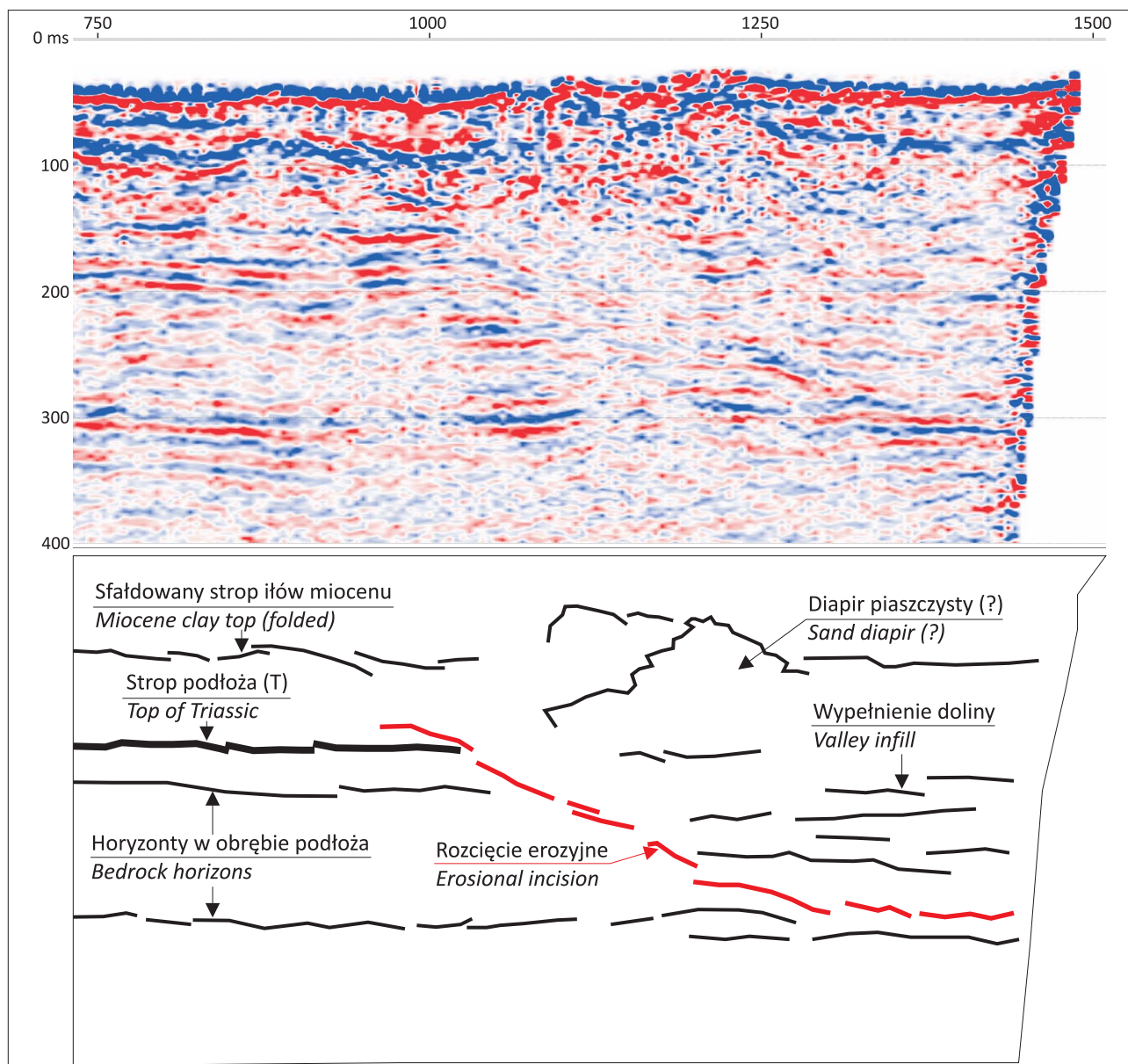
Na podstawie zdobytych w trakcie realizacji zadania doświadczeń można sformułować wskazówki dotyczące możliwości rozpoznania budowy geologicznej dolin kopalnych z zastosowaniem bezinwazyjnych metod geofizycznych. Dobór metod zależy przede wszystkim od stopnia już istniejącego rozpoznania, wielkości struktury i oczekiwanej szczegółowości rozpoznania. W badaniach korzystne jest zastosowanie etapowego podejścia kolejnych przybliżeń, gdzie kolejne badania stopniowo uszczegółwiają rozpoznanie geologiczne. Planowanie kolejnych etapów badań powinno się odbywać na podstawie badań wykonanych wcześniej, z dopuszczeniem dużej elastyczności. Szczególnie przydatne są tu badania geofizyczne wywodzące się

z geofizyki inżynierskiej, których prowadzenie nie wymaga zwykle formalnych zezwoleń.

W przypadku badań przeglądowych na obszarach, na których nie zidentyfikowano dotychczas występowania dolin kopalnych, duży potencjał mogą mieć archiwalne badania SGE. W wielu rejonach pozagórskich prowadzono prace mające na celu identyfikację miejsc lokalizacji ujęć wód podziemnych. Prace te obejmowały wykonanie sondowań elektrooporowych w siatce lub gęstych profilach. Pas od Dolnego Śląska, poprzez południową Wielkopolskę, aż do północnego Mazowsza jest pokryty takimi badaniami. Wyniki sondowań są częściowo zachowane jako dane cyfrowe, a częściowo w postaci papierowych wykresów wymagających digitalizacji. Już zestawienie surowych danych pomiarowych i wykonanie map pseudooporowości dla poziomów głębokościowych, tak jak w przypadku rozwiązania zastosowanego dla poligonu badawczego Sierpc, może wnieść cenne informacje na temat lokalizacji nieznanymi form dolin kopalnych lub wyznaczyć zasięg form znanych. Przetworzenie (dokonanie inwersji opornościowej) wybranych archiwalnych krzywych pomiarowych może dać kolejne przybliżenie, dotyczące zasięgu przestrzennego i głębokościowego zidentyfikowanych form, oraz oporności rzeczywistej wypełnień.

Obserwacje poczynione w trakcie realizacji zadania wskazują, że ozy i formy akumulacji szczelinowej występujące na powierzchni terenu są dobrymi indykatorami występowania dolin kopalnych w podłożu, również tych pogrzebanych. W rejonach, gdzie nie istnieją inne dane (na przykład archiwalne sondowania SGE) strefy występowania takich form sedymentacyjnych mogą być rozważane jako potencjalne miejsca występowania dolin kopalnych.

W przypadku znanych dolin kopalnych wskazane jest wstępne określenie geometrii danej formy (zasięgu



Ryc. 4. Horyzonty refleksyjne na sekcji G3_reflex wraz z interpretacją (fragment). Krawędź pogrzebanej doliny kopalnej wcinającej się w podłoże przedkenozoiczne

Fig. 4. Reflection section (G3_reflex) with interpretation. The erosional edge of deeply incised valley. Incision in Mesozoic strata down to approx. 300 m

przestrzennego i jej głębokości) oraz wyznaczenie oporności ośrodka, co pozwala wstępnie określić dominującą litologię wypełnienia. Sondowania SGE lub sondowania elektromagnetyczne (np. TEM), wykonane w siatce i pokrywające spodziewany zasięg doliny wraz z fragmentem otaczających utworów, pozwalają na stworzenie wstępnego modelu przestrzenno-opornościowego takiej formy. Analizę wyników najkorzystniej jest prowadzić na mapach ścięcia. Warunkiem uzyskania miarodajnego obrazu z takich badań jest równomierne i gęste pokrycie badaniami całego obszaru będącego w sferze zainteresowania. W przypadku poligonu Rospuda sondowania TEM były rozmieszczone zbyt rzadko, w efekcie mapy opornościowe mają zbyt małą rozdzielczość w stosunku do stopnia skomplikowania budowy geologicznej obszaru.

Badania liniowe, takie jak badania sejsmicznej tomografii refrakcyjnej i tomografii elektrooporowej, powinny być planowane dopiero na podstawie wstępnego obrazu uzyskanego z rozproszonych badań punktowych. Badania

te powinny mieć na celu doprecyzowanie modelu budowy geologicznej w strefach szczególnie skomplikowanych lub służyć jako uszczegółowienie wcześniejszego rozpoznania. Korzystne jest wykonanie badań elektrooporowych i sejsmicznych wzdłuż tych samych linii. Wyniki oporności i wartości prędkości fal sejsmicznych dają komplementarne informacje. Na podstawie samych badań sejsmicznych nie ma możliwości określenia litologii podłoża, natomiast wartość oporności często nie wnosi informacji na temat położenia granic strukturalnych i erozyjnych. Badania ERT są też metodą dającą rzetelne rezultaty w najmniejszym zakresie głębokościowym. Sejsmiczne badania refleksyjne zwykle nie wnoszą wiele informacji na temat najpłytszych warstw podłoża, jednak są nieocenione dla rozpoznania głębszych warstw, jak w przypadku występowania głębokich rozcięć erozyjnych lub stref uskokowych w podłożu, kontrolujących rozmieszczenie dolin. Przetwarzanie do sekcji refleksyjnych można często wykonać z danych terenowych pozyskanych pierwotnie dla techniki SRT. Dłate-

go wydaje się zasadne, żeby w trakcie badań sejsmicznych stosować procedurę pomiarową umożliwiającą przetwarzanie techniką głębokościowych punktów wspólnych.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania geofizyczne pozwoliły w różnym stopniu rozpoznać budowę geologiczną dolin kopalnych. Przestrzenny zasięg poszczególnych dolin najlepiej oddały badania z wykorzystaniem rozproszonych sondowań oporności. Warunkiem tego rozpoznania było jednak zastosowanie zagęszczenia pomiarów odpowiadającego wielkości obiektów geologicznych występującym na danym obszarze. Badania liniowe umożliwiły precyzyjne określenie zasięgu głębokościowego oraz morfologii dna rozcięć. Zmienność litologiczną w obrębie podłoża oraz wypełnienia rejestruje się z trudnością. Jedynie obrazowanie oporności pozwala na przybliżone określenie składu ośrodka podłoża. Badania liniowe były przydatne do rozpoznania podłoża dolin kopalnych, szczególnie obrazowania elementów tektonicznych i glacitektonicznych, które miały wpływ na rozwój tych form.

Przeprowadzone badania złożowe wskazują, że potencjał występowania ekonomicznych nagromadzeń minerałów ciężkich jest niski, szczególnie w przypadku dolin o genezie glacialnej. Skład mineralny frakcji minerałów ciężkich określony w badanych próbkach również nie budzi szczególnego zainteresowania. We wszystkich próbkach przeważają tlenki żelaza oraz granaty.

Realizacja zadania umożliwiła przetestowanie metodyki rozpoznania dolin kopalnych z zastosowaniem technik badawczych geofizyki inżynierskiej. Doświadczenia uzyskane w trakcie realizacji zadania pozwalają na efektywne projektowanie i wykonanie badań na tego typu obiektach. Szczególnie istotne znaczenie ma etapowe podejście do badań, prowadzone w myśl zasady „od ogółu do szczegółu”.

Realizacja zadania była możliwa dzięki finansowaniu uzyskanemu w ramach dotacji (umowa nr 1453/2020/Wn-07/FG-SM-DN/) Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej finansującej zadania z zakresu państwowej służby geologicznej. Bardzo dziękuję Recenzentowi za wszelkie uwagi, które wpłynęły na jakość tekstu.

LITERATURA

- BRZEZIŃSKA-WÓJCIK T., KOCIUBA W. 2001 – Transformacja roztoczańskiego odcinka doliny Wieprza w plejstocenie. *Prz. Geol.*, 49 (3): 257–266.
- CZARNICKA-CHODKOWSKA D. 1991 – Formy ozowe na obszarze Polski. Katalog. Muzeum Ziemi PAN.
- FRYDRYCH M., RDZANY Z. 2016 – Tunnel valleys of old glacial land systems in Poland. *Acta Geobalkan.*, 2 (2): 77–84; <https://doi.org/10.18509/AGB.2016.08>
- HUUSE M., LYKKE-ANDERSEN H. 2000 – Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. *Quater. Sci. Rev.*, 19 (12): 1233–1253; [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00103-1)
- MARKS L., GRABOWSKI J., STĘPIEŃ U. (red.) 2022 – Mapa Geologiczna Polski 1 : 500 000. <https://geologia.pgi.gov.pl>
- MICHNIEWICZ M., CZERSKI M., KIELCZAWA J., WOJTKOWIAK A. 1996 – Staroplejstocenska sieć dolin kopalnych Sudetów Zachodnich i ich przedpoła. *Prz. Geol.*, 44 (12): 1232–1238.
- MIKOŁAJKÓW J., JÓZWIĄK K. 2002 – Zagrożenia jakości wód doliny kopalnej w rejonie Sierpc – Bielsk oraz obszarów ich zasilania. *Pr. Wydz. Nauk o Ziemi UŚ, Jakość i podatność wód podziemnych na zanieczyszczenia*, 22: 139–148.
- OSTROWSKI S., PACANOWSKI G., MAJER E., SOKOŁOWSKA M. 2023 – Badania geologiczno-inżynierskie. Geofizyka inżynierska. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PRZYBYLSKI B., BADURA J., CZERWONKA J.A., KRZYSZKOWSKI D., KRAJEWSKA K., KUSZELL K. 1998 – The preglacial Nysa Kłodzka fluvial system in the Sudetic Foreland, southwestern Poland. *Geol. Sud.*, 31: 171–196.
- RDZANY Z., FRYDRYCH M., SZMIDT A., SZUBERT M. 2018 – Morfogeneza rynien subglacialnych i ozów na przykładach z obszarów staroglacjalnych. [W:] Kostrzewski A., Stach A., Majewski M. (red.), *Geneza i stratygrafia utworów czwartorzędowych. Tom VII: 165–170.*
- RDZANY R., FRYDRYCH M., SZMIDT A., TARNAWSKA K. 2015 – W sprawie genezy i wieku form rzeźby glacialnej pogranicza Wysoczyzn Kaliskiej i Tureckiej. *Acta Univer. Lodz., Folia Geograph. Physic.*, 14: 37–53; doi: 10.18778/1427-9711.14.04
- SZUBERT M. 2012 – Plejstocenska morfogeneza Wyżyny Woźnicko-Wieluńskiej związana ze stadiem maksymalnym zlodowacenia Odry w świetle geostatystycznej rekonstrukcji powierzchni podplejstocenskiej. *UKEN, Pr. Monograf.*, 635: 1–181.
- URBAŃSKI P. 2010 – Osady złotożone doliny potoku Kraszówka (Pogórze Kaczawskie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 439: 375–388.
- VAN DER VEGT P., JANSZEN A., MOSCARIELLO A. 2021 – Tunnel valleys: current knowledge and future perspectives. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 368; doi: 10.1144/SP368.13
- WIERCHOWIEC J. 2002 – Morphology and chemistry of placer gold grains – indicators of the origin of the placers: An example from the East Sudetic Foreland, Poland. *Acta Geol. Pol.*, 52 (4): 563–576.
- WOJCIECHOWSKI A. 1994 – Złotożoność dorzeczy Odry. *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol. Warszawa.*