

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. LXXXI

SECTIO B

2026

PIOTR WILKOŁAZKI

<https://orcid.org/0000-0001-7411-1991>

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska

wilkolazkipiotr@gmail.com

SZYMON OSTROWSKI

<https://orcid.org/0000-0003-2766-941X>

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska

ssostrowski@gmail.com

JAKUB JABŁOŃSKI

<https://orcid.org/0009-0001-8156-9818>

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska

jakub.jablonski@pgi.gov.pl

MARCIN LASOCKI

<https://orcid.org/0000-0001-5053-7672>

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska

marcin.lasocki@pgi.gov.pl

Rozpoznanie budowy geologicznej mokradeł Polesia Zachodniego z zastosowaniem wielokomponentowego podejścia do analizy fal powierzchniowych

Identification of the Geological Structure of the Western Polesie Wetlands
Using a Multicomponent Surface Wave Analysis Approach

Abstract: The wetlands of Western Polesie form one of the most valuable peatland–lake complexes in Poland. Their functioning is strongly controlled by the geological structure of the subsurface and local hydrogeological conditions. Progressive degradation of these environments, driven in part by land drainage and changes in the water regime, poses a significant threat to the ecological integrity of the region and may, in the long term, adversely affect its hydrological and hydrogeological conditions. A re-

liable assessment of ongoing environmental changes therefore requires detailed characterization of the geological structure, particularly within the near-surface zone. This study evaluates the applicability of non-invasive engineering geophysical methods for investigating the shallow geological structure of Western Polesie, with particular emphasis on organic soils, including peat. Multichannel analysis of surface waves (MASW) was applied using both Rayleigh and Love waves, allowing the two wave types to be analyzed independently and their results to be compared. Four survey profiles representing contrasting lithological conditions were selected on the basis of GIS and cartographic analyses. These included the processing and interpretation of a Digital Elevation Model (DEM) and its derivatives, such as slope, aspect, and hillshade maps, together with geological and topographic data and a spatial assessment of site accessibility. Field surveys were conducted in 2025, and the acquired seismic data were processed to obtain two-dimensional shear-wave velocity (V_s) sections. The results revealed distinct differences in the sensitivity of Rayleigh and Love waves to variations in the mechanical properties of the subsurface associated with lithological changes. Integrating the results obtained from both wave types reduced interpretational ambiguity and enabled a more robust reconstruction of the near-surface geological structure. The findings demonstrate that a multicomponent MASW approach can substantially improve geological characterization in wetland environments and represents a valuable tool for investigating and supporting the protection of degraded organic soils in Western Polesie.

Keywords: Western Polesie; MASW; Love waves; Rayleigh waves; near-surface seismic; organic soils; near-surface geophysics

Abstrakt: Mokradła Polesia Zachodniego stanowią jeden z najcenniejszych kompleksów torfowisko-jeziornych w Polsce, którego funkcjonowanie jest ściśle związane z budową geologiczną podłoża i warunkami hydrogeologicznymi. Postępująca degradacja tych obszarów, związana m.in. z działalnością melioracyjną i zmianami stosunków wodnych, stanowi zagrożenie przyrodnicze dla tego unikalnego regionu, a w dalszej perspektywie może negatywnie wpłynąć na stosunki hydrologiczne i hydrogeologiczne regionu. Prawidłowa ocena następujących zmian środowiska mokradeł wymaga rozpoznania budowy geologicznej, szczególnie warstw przypowierzchniowych. W celu oceny możliwości wykorzystania bezinwazyjnych badań geofizycznych do określenia budowy geologicznej zastosowano metody z grupy metod sejsmiki inżynierskiej. Celem opracowania jest ocena przydatności wyników badań sejsmicznych fal powierzchniowych wykorzystujących fale Rayleigha i Love’a do rozpoznania budowy geologicznej Polesia Zachodniego, ze szczególnym uwzględnieniem gruntów organicznych, w tym torfów. Badania przeprowadzono przy pomocy wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (MASW – *multichannel analysis of surface waves*) w wersji wielokomponentowej. Metoda ta umożliwia oddzielną analizę obu typów fal oraz ich wzajemne porównanie. Na podstawie analiz GIS i danych kartograficznych, obejmujących przetwarzanie i interpretację Numerycznego Modelu Terenu (NMT) oraz jego pochodnych (m.in. map nachylenia, ekspozycji i cieniowania), a także analizę danych geologicznych i topograficznych oraz ocenę dostępności terenu z wykorzystaniem metod przestrzennych, wyznaczono cztery profile badawcze reprezentujące zróżnicowane warunki litologiczne. Pomiaru terenowe wykonano w 2025 r., a zarejestrowane dane poddano przetworzeniu w celu konstrukcji przekrojów rozkładu prędkości fali poprzecznej (V_s). Uzyskane wyniki wykazały istotne różnice w czułości fal Rayleigha i Love’a na zmienność właściwości mechanicznych podłoża, które są pochodną litologii. Kompilacja wyników obu metod pozwoliła na ograniczenie niejednoznaczności interpretacyjnych i uzyskanie bardziej wiarygodnego modelu przypowierzchniowej budowy geologicznej. Badania potwierdzają, że zastosowanie wielokomponentowego podejścia do pomiarów MASW znacząco zwiększa skuteczność rozpoznania geologii

terenów mokradłowych i stanowi wartościowe narzędzie w analizie oraz ochronie zdegradowanych gruntów organicznych Polesia Zachodniego.

Słowa kluczowe: Polesie Zachodnie; MASW; fale Love'a; fale Rayleigha; sejsmika inżynierska; grunty organiczne; geofizyka

WSTĘP

Mokradła Polesia Zachodniego, obejmujące rozległe kompleksy torfowiskowe i jeziorne, należą do największych i najlepiej zachowanych ekosystemów mokradłowych w Europie oraz stanowią jeden z najcenniejszych obszarów przyrodniczych Polski (Kucharczyk i in., 2025; Montanarella i in., 2006). Cechują się wysoką złożonością strukturalną oraz dużą wrażliwością na zmiany środowiskowe, dzięki czemu odgrywają istotną rolę w funkcjonowaniu systemów przyrodniczych w skali nie tylko lokalnej, lecz także regionalnej.

Uwarunkowania geomorfologiczne i hydrogeologiczne, w tym płytkie zaleganie wód podziemnych oraz znaczna akumulacja materii organicznej, powodują, że znaczenie tych ekosystemów wzrasta w dobie zmian klimatu i nasilającej się presji antropogenicznej. Mokradła pełnią kluczowe funkcje retencyjne, biogeochemiczne i klimatyczne, a ich stabilność jest ściśle powiązana z reżimem wodnym i budową geologiczną podłoża (Chmielewski i in., 2020).

Pomimo gęstej sieci hydrograficznej obszar Polesia Lubelskiego doświadcza okresowych deficytów wody, szczególnie latem (Mażajski i in., 2020). W czasie susz torfowiska i osady gytiowe stanowią istotne rezerwuary wody, podtrzymujące funkcjonowanie jezior i cieków (Michalczyk i Głowacki, 2008; Mięsiak-Wójcik, 2018).

Największe przekształcenia hydrologiczne Polesia nastąpiły w drugiej połowie XX w. w związku z melioracjami, budową kanału Wieprz-Krzna oraz rozwojem górnictwa i turystyki. Regulacja cieków i rozbudowa sieci rowów odwadniających doprowadziły do obniżenia poziomu wód podziemnych, zwiększenia amplitudy ich wahań oraz redukcji powierzchni mokradeł, powodując okresowe przesuszenia i zanik małych zbiorników (Janiec, 1993; Michalczyk i Wilgat, 1998; Michalczyk i in., 2002; Wilgat i in., 1992).

Skala i trwałość tych zmian sprawiają, że restauracja mokradeł Polesia Zachodniego jest niezbędna. Jej skuteczne planowanie wymaga jednak szczegółowego rozpoznania budowy geologicznej, gdyż zróżnicowana rzeźba podczwartorzędowa, formy erozyjne oraz procesy krasowe i termokrasowe determinują rozmieszczenie i funkcjonowanie mokradeł (Dobrowolski, 2006, 2010; Janiec, 2014).

W rozpoznaniu budowy geologicznej torfowisk i innych obszarów mokradłowych coraz częściej stosowane są nieinwazyjne metody geofizyczne, umożliwiające

określenie geometrii basenów torfowych oraz zróżnicowania ich budowy wewnętrznej bez konieczności wykonywania licznych otworów i sondowań. Metody geofizyczne wykorzystywano m.in. do rozpoznania morfologii basenów torfowych oraz identyfikacji granic i zróżnicowania stratygraficznego osadów organicznych i mineralnych (Comas i in., 2004; Pezdir i in., 2021). Ich zastosowanie jest szczególnie istotne na obszarach o wysokim poziomie wód gruntowych i ograniczonej dostępności terenowej, gdzie tradycyjne metody rozpoznania mogą być utrudnione.

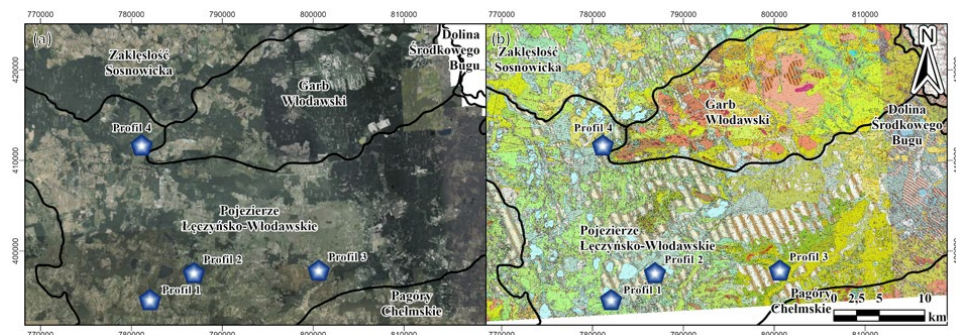
Wśród metod sejsmicznych stosowanych do rozpoznania płytkiej budowy podłoża szczególne znaczenie ma wielokanałowa analiza fal powierzchniowych (MASW – *multichannel analysis of surface waves*), umożliwiająca określenie przestrzennego rozkładu prędkości fali poprzecznej (V_s) na podstawie analizy właściwości dyspersyjnych fal powierzchniowych (Ostrowski i in., 2023). Metoda ta znajduje zastosowanie w rozpoznawaniu właściwości mechanicznych przypowierzchniowej części ośrodka oraz identyfikowaniu granic pomiędzy warstwami o różnej sztywności (Foti, 2005; Foti i in., 2018; Rix, 2004). W klasycznym podejściu MASW szczególne znaczenie przypisuje się falom Rayleigha, natomiast zastosowanie rejestracji wielokomponentowej umożliwia również analizę fal Love’a. Wykorzystanie obu typów fal może dostarczyć komplementarnej informacji o właściwościach mechanicznych ośrodka, szczególnie w warunkach silnie zróżnicowanej litologii i wysokiego nasycenia wodą.

Pomimo rozwoju metod geofizycznych ich zastosowanie do szczegółowego rozpoznawania płytkiej budowy geologicznej mokradła pozostaje wyzwaniem ze względu na znaczną zmienność właściwości fizycznych i mechanicznych osadów organicznych, ich wysokie nasycenie wodą oraz częste występowanie kontrastów pomiędzy osadami organicznymi, mineralnymi i podłożem skalnym. W tym kontekście zastosowanie wielokomponentowej analizy fal powierzchniowych, obejmującej jednoczesną analizę fal Rayleigha i Love’a, może stanowić wartościowe uzupełnienie klasycznego podejścia MASW, pozwala bowiem na porównanie informacji uzyskanych z obu typów fal i ocenę ich przydatności w rozpoznaniu złożonej budowy geologicznej terenów mokradłowych.

OBSZAR BADAŃ

Polesie Zachodnie, obejmujące m.in. Pojezierze Łęczyńsko-Włodawskie oraz zachodnią część Polesia Wołyńskiego, znajduje się na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego (Bałaga i in., 1992; zob. ryc. 1). Jego usytuowanie w obrębie stabilnej platformy prekambryjskiej wiąże się z brakiem istotnych deformacji tektonicznych w piętrze pokrywowym, co skutkuje monotonną, słabo urozmaiconą

rzeźbą powierzchni. Pomimo tej pozornej jednorodności morfologicznej region cechuje się złożoną budową geologiczną pokrywy czwartorzędowej (zob. ryc. 2), która w istotny sposób determinuje rozmieszczenie i funkcjonowanie ekosystemów mokradłowych.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań na tle (a) ortofotomapy (Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2025b) oraz (b) *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski*, z jednostkami fizycznogeograficznymi Polesia Zachodniego i lokalizacją profili geofizycznych

Fig. 1. Study area shown against (a) orthophotomap (Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2025b) and (b) Detailed Geological Map of Poland, with physiogeographic units of Western Polesie and geophysical profiles locations

Podłoże podczwartorzędowe w rejonie badań zbudowane jest z węglanowych skał górnej kredy, w tym kredy piszącej i margli, o wysokiej podatności na denudację i rozwój krasu powierzchniowego (Harasimiuk i Dobrowolski, 2010; Harasimiuk i in., 1998; Janiec, 2014). Miąższość utworów kredowych miejscami przekracza 850 m, a ich nierówności odzwierciedlają aktywność neotektoniczną regionu (Bałaga i in., 2006; Dobrowolski i Harasimiuk, 2002).

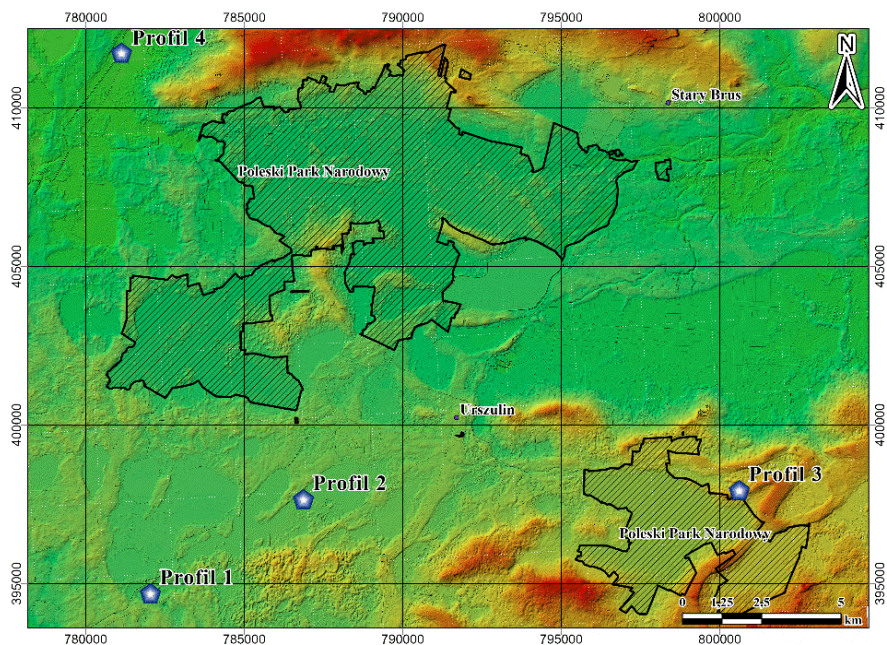
Pokrywa czwartorzędowa jest zróżnicowana i obejmuje plejstocénskie osady lodowcowe oraz holocénskie osady organogeniczne. Jeziora Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego związane są z paleoformami rynnowymi i dolinnymi (Bałaga, 2006; Bałaga i in., 1983), a torfy i gytiowe osady limniczne zalegają często bezpośrednio na piaskach fluwiogłacialnych.

Wysoki poziom wód gruntowych, młoda i heterogeniczna pokrywa osadowa oraz silnie rozczłonkowane podłoże kredowe utrudniają tradycyjne badania terenowe (Harasimiuk i in., 1998). Nowoczesne metody bezinwazyjne, oparte o techniki sejsmiczne, pozwalają uniknąć wielu ograniczeń innych metod badawczych. Ich szersze zastosowanie może przyczynić się do lepszego rozpoznania budowy geologicznej, co pozwoli na wsparcie działań mających na celu ochronę przyrody i renaturyzację mokradeł.

METODY

Prace badawcze poprzedzono analizą przestrzenną w GIS w celu rozpoznania uwarunkowań geomorfologicznych i geologicznych oraz wyznaczenia optymalnych lokalizacji profili geofizycznych. Wykorzystano Numeryczny Model Terenu (NMT; zob. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2025a) i jego pochodne, w tym mapę nachylenia, która pozwala identyfikować subtelne formy rzeźby, takie jak obniżenia, garby i strefy przejściowe istotne dla funkcjonowania mokradeł. Uzupełniając użyto arkuszy *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski* (Kucharska, 2021; Pochocka-Szwarc, 2019, 2020; Żarski i Morawski, 2013) do określenia litologii podłoża, zasięgu osadów czwartorzędowych i stref kontaktu utworów o różnej charakterystyce hydrogeologicznej. Integracja danych umożliwiła wskazanie obszarów o zwiększonej zmienności budowy podłoża i znaczeniu dla reżimu wodnego mokradeł.

Na tej podstawie wyznaczono cztery obszary badań geofizycznych (zob. ryc. 2) w strefach kontrastów geomorfologicznych i geologicznych, tak aby uchwycić zmienność warunków podłoża i stosunków wodnych, z uwzględnieniem ograniczeń terenowych charakterystycznych dla mokradeł.



Ryc. 2. Lokalizacja profili badawczych na tle cieniowanego reliefu numerycznego modelu terenu (Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2025a)

Fig. 2. Localization of the surveys profiles on a shaded digital terrain model (Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2025a)

Do szczegółowego rozpoznania przypowierzchniowej budowy geologicznej zastosowano wielokanałową analizę fal powierzchniowych MASW. Metoda MASW wykorzystuje dyspersyjny charakter fal powierzchniowych, których prędkość fazowa w ośrodku warstwowanym zależy od częstotliwości i długości fali, a tym samym od właściwości mechanicznych warstw położonych na różnych głębokościach (Foti, 2005; Foti i in., 2018; Rix, 2004). Fale o większych długościach są wrażliwe na głębsze partie ośrodka, podczas gdy fale krótsze dostarczają informacji przede wszystkim o jego części przypowierzchniowej. Analiza zależności prędkości fazowej od częstotliwości pozwala na wyznaczenie krzywej dyspersji, która następnie stanowi podstawę inwersji prowadzącej do określenia zmian prędkości fali poprzecznej V_s wraz z głębokością.

Prędkość fali poprzecznej V_s jest związana ze sztywnością ośrodka, dzięki czemu zmiany tego parametru mogą służyć do identyfikacji granic pomiędzy warstwami o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych. Wartości V_s nie stanowią jednak jednoznacznego wskaźnika litologii, dlatego interpretację przekrojów prowadzono w odniesieniu do lokalnych danych geologicznych i geomorfologicznych.

W badaniach wykorzystano zarówno fale Rayleigha, jak i fale Love'a. W przypadku fal Rayleigha ruch cząstek odbywa się głównie w pionowej płaszczyźnie zgodnej z kierunkiem propagacji fali, natomiast fale Love'a charakteryzują się poziomym ruchem poprzecznym względem kierunku propagacji. Zastosowanie obu typów fal umożliwiło uzyskanie dwóch niezależnych zestawów informacji o właściwościach mechanicznych ośrodka, które następnie porównywano i integrowano na etapie konstrukcji przekrojów V_s .

W badaniach terenowych wykorzystano 90 bezprzewodowych, trójskładowych geofonów nodalnych SmartSolo o częstotliwości własnej 4,5 Hz, rozmieszczonych co 1 m. Punkty wzbudzania rozmieszczono co 4 m wzdłuż profilu. Źródłem energii sejsmicznej był młot ręczny o masie 8 kg. Fale Rayleigha wzbudzano poprzez pionowe uderzenia w płytę gumową, natomiast fale Love'a poprzez poziome uderzenia w stalowe kowadło. Zastosowanie trójskładowych geofonów umożliwiło rejestrację składowych wykorzystywanych następnie niezależnie w analizie obu typów fal.

Pomiary prowadzono metodą roll-along. Układ 90 geofonów podzielono organizacyjnie na trzy grupy po 30 instrumentów. W początkowym ustawieniu obejmowały one kolejno geofony 1–30, 31–60 i 61–90. Wzbudzenia wykonywano co 4 m, rozpoczynając od początku rozstawu i kontynuując pomiary do końcowej części drugiej grupy geofonów. Następnie pierwszą grupę 30 geofonów przenoszono na koniec układu, za grupę obejmującą geofony 61–90. Po wykonaniu kolejnej serii wzbudzeń analogicznie przenoszono następną grupę 30 instrumentów. Pro-

cedurę powtarzano aż do osiągnięcia końca profilu. Pozwalało to na zachowanie ciągłości przestrzennej pomiarów przy jednoczesnym sukcesywnym przesuwaniu układu pomiarowego.

Do analizy MASW dla każdego punktu wzbudzania wybierano okno danych obejmujące 30 kolejnych geofonów znajdujących się od punktu wzbudzania w kierunku dalszego przebiegu profilu. W kolejnych położeniach źródła okno to przesuwano wraz z punktem wzbudzania. Dzięki zastosowaniu stałego 30-kanalowego okna zachowano porównywalną geometrię danych wykorzystywanych w analizie kolejnych fragmentów profilu.

Przetwarzanie danych, analizę dyspersji oraz inwersję przeprowadzono w programie GeoGiga Surface Plus. Dane dla fal Rayleigha i Love'a analizowano niezależnie. Obrazy dyspersji generowano za pomocą funkcji *wavefield transform* w domenie częstotliwość–prędkość fazowa ($F-V$). Maksymalną prędkość fazową ustawiono na 1000 m/s, przy kroku 5 m/s, natomiast maksymalną częstotliwość obrazu dyspersji na 60 Hz, przy kroku 0,2 Hz. Podczas transformacji aktywowane były opcje *trace balance* oraz *spectrum balance*.

Dla obu typów fal generowano oddzielne obrazy dyspersji, z których krzywe dyspersji wybierano manualnie, punkt po punkcie. Interpretowano wyłącznie mod podstawowy (*fundamental mode*), bez uwzględniania modów wyższych. Zastosowano półautomatyczne pikowanie. Zakres częstotliwości wykorzystywany do inwersji nie był przyjmowany jako jednakowy dla wszystkich rekordów, lecz dobierano go indywidualnie podczas interpretacji w zależności od czytelności i ciągłości przebiegu modu podstawowego na obrazie $F-V$. Do dalszej analizy wykorzystano wyłącznie fragment krzywej, który można było wiarygodnie zidentyfikować. Wartość 60 Hz stanowiła zatem maksymalną częstotliwość generowanego obrazu dyspersji, a nie stałą górną granicę wszystkich krzywych wykorzystanych w inwersji. Wyznaczone krzywe dyspersji fal Rayleigha i Love'a poddano następnie niezależnej inwersji w programie GeoGiga Surface Plus. W zależności od analizowanego zestawu danych jako typ fali wskazano Rayleigh lub Love. Inwersję prowadzono z wykorzystaniem algorytmu genetycznego (GA – *genetic algorithm*). Zastosowano 30 iteracji, populację 128 modeli ($GA\ population = 128$) oraz wartość parametru *inversion object resolution* równą 2 m/s. Przy zastosowanych ustawieniach program automatycznie wygenerował model początkowy składający się z 12 warstw. Model początkowy nie był modyfikowany ręcznie przed rozpoczęciem inwersji, a pozostałe parametry pozostawiono zgodne z domyślnymi ustawieniami programu.

W wyniku niezależnej inwersji krzywych dyspersji uzyskano dla kolejnych lokalizacji jednowymiarowe modele zmian prędkości fali poprzecznej V_s wraz z głębokością. Modele te wykorzystano następnie do interpolacji i konstrukcji

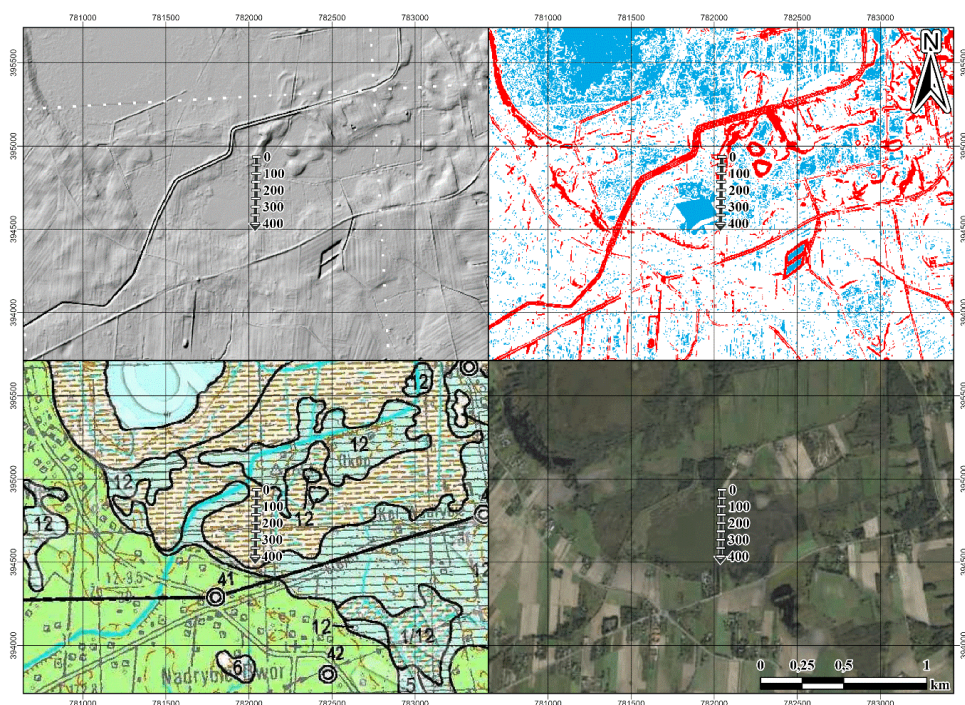
dwuwymiarowych przekrojów prędkościowych. Dla każdego profilu wykonano trzy warianty: przekrój oparty na wynikach fal Rayleigha, przekrój oparty na wynikach fal Love'a oraz przekrój zintegrowany, utworzony na podstawie obu zestawów modeli Vs.

Integracja obu typów fal nie polegała na wspólnej inwersji krzywych dyspersji. Krzywe fal Rayleigha i Love'a były wybierane i inwertowane niezależnie, a ich wyniki łączono dopiero na etapie interpolacji końcowych wartości Vs. W przekroju zintegrowanym do utworzenia końcowej siatki wynikowej wykorzystano jednocześnie modele Vs uzyskane z obu typów fal, bez dodatkowego ręcznego ważenia wyników. Tak otrzymane przekroje zestawiono z wynikami uzyskanymi oddzielnie dla fal Rayleigha i Love'a (zob. ryc. 4, 6, 8 i 10).

WYNIKI

Na podstawie analizy uwarunkowań geologicznych i geomorfologicznych wykonano akwizycję terenową wzdłuż czterech linii pomiarowych reprezentujących zróżnicowane warunki litologiczne i hydrologiczne Polesia Zachodniego. Analizie poddano obrazy dyspersji fal Rayleigha i Love'a oraz uzyskane z nich profile prędkości fal poprzecznych (Vs), opracowane niezależnie dla obu typów fal, a następnie zestawione w celu porównania.

Profil 1, poprowadzony wzdłuż grobli przecinającej zbiornik wodny w Zarybiu (zob. ryc. 3), ujawnił wyraźny kontrast między materiałem nasypowym a podłożem organicznym. Analiza fal Rayleigha wskazała zakres Vs od około 130 do 600 m/s, przy systematycznym wzroście prędkości z głębokością i niewielkiej zmienności w przypowierzchniowej strefie do około 5 m. Na przekrojach uzyskanych w wyniku analizy fal Love'a rejestrowano węższy przedział prędkości (130–280 m/s) oraz strefę obniżonych wartości pomiędzy rzędnymi około 164–156 m n.p.m., co podkreślało obecność warstw o niskiej sztywności. Zestawienie wyników obu metod wykazało różnice w obrazie przypowierzchniowej struktury ośrodka (zob. ryc. 4).

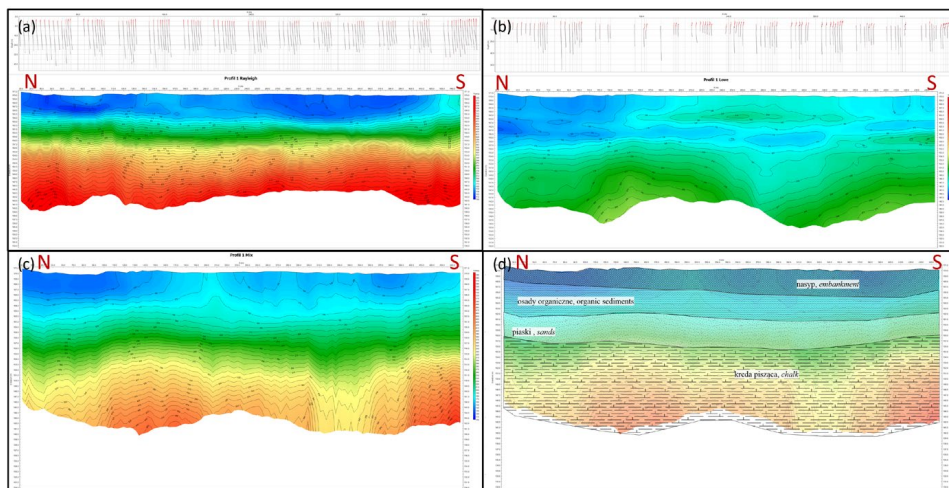


Objaśnienie wydzielen geologicznych: 1 – torfy niskie; 1/12 – torfy niskie na piaskach, mulkach i iłach jeziorno-rzecznych (rozlewiskowych); 5 – piaski humusowe i mulki rzeczno-deluwialne; 12 – piaski, mulki i ły jeziorno-rzeczne (rozlewiskowe).

Explanation of geological features: 1 – fen peat; 1/12 – fen peat over lacustrine-fluvial (floodplain) sands, silts, and clays; 5 – humic sands and fluvial-deluvial silts; 12 – lacustrine-fluvial (floodplain) sands, silts, and clays.

Ryc. 3. Profil 1 na tle (a) cieniowanego reliefu numerycznego modelu terenu, (b) mapy nachylenia terenu, (c) Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, arkusz Orzechów Nowy (715) (Kucharska, 2021), (d) ortofotomapy (opracowanie własne)

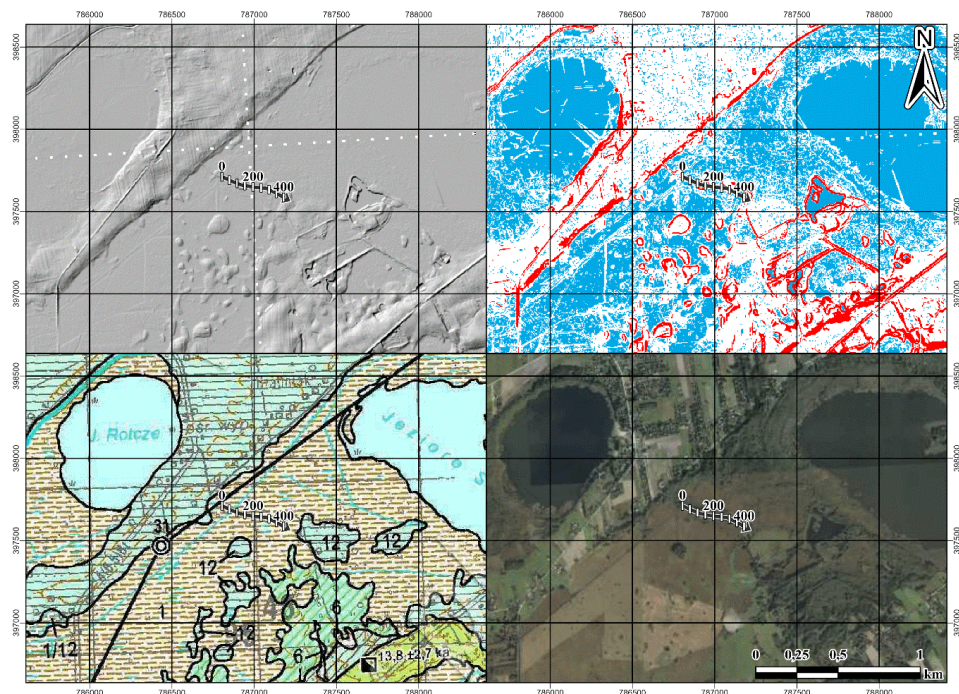
Fig. 3. Profile 1 shown against (a) shaded relief of the digital terrain model, (b) terrain slope map, (c) Detailed Geological Map of Poland at a scale of 1:50,000, Orzechów Nowy sheet (715) (Kucharska, 2021), and (d) orthophotomap (Authors' own elaboration)



Ryc. 4. Profil 1: przekroje rozkładu prędkości fali poprzecznej V_s uzyskane na podstawie badań MASW: (a) na podstawie analizy fal Rayleigha, (b) na podstawie analizy fal Love'a, (c) zintegrowany przekrój V_s uzyskany przez interpolację modeli V_s z niezależnych analiz fal Rayleigha i Love'a, (d) szkic interpretacyjny (opracowanie własne)

Fig. 4. Profile 1: cross-sections of S-wave velocity (V_s) distribution derived from MASW surveys: (a) based on Rayleigh-wave analysis, (b) based on Love-wave analysis, (c) integrated V_s section obtained by interpolation of V_s models derived independently from Rayleigh- and Love-wave analyses, (d) interpretative sketch (Authors' own elaboration)

Profil 2, zlokalizowany w obszarze torfowisk z lokalnymi wychodniami kredy piszącej (zob. ryc. 5), charakteryzował się silnym kontrastem właściwości mechanicznych. W wyniku analiz fal Rayleigha uzyskano szeroki zakres wartości V_s (około 130–600+ m/s), z wyraźnym wzrostem wartości w głębszych partiach profilu. Analizy z wykorzystaniem fal Love'a wskazały zakres 100–400 m/s i pozwoliły na czytelniejsze wydzielenie stref podwyższonych prędkości odpowiadających podłożu skalnemu. Kompilacja obu typów fal umożliwiła identyfikację zmienności stropu kredy oraz miąższości osadów organicznych (zob. ryc. 6).

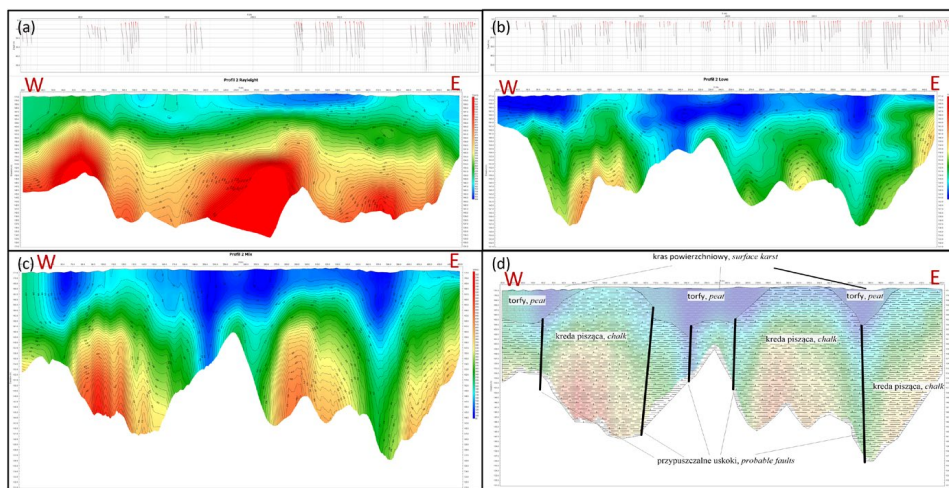


Objaśnienie wydzieleni geologicznych: 1 – torfy niskie; 1/12 – torfy niskie na piaskach, mulkach i iłach jeziorno-rzecznych (rozlewiskowych); 6 – piaski humusowe, mulki i ropy zagłębień bezodpływowych i okresowo przepływowych; 11 – piaski, żwiry i mulki rzeczno-peryglacjalne; 12 – piaski, mulki i ropy jeziorno-rzeczne (rozlewiskowe).

Explanation of geological features: 1 – fen peat; 1/12 – fen peat over lacustrine-fluvial (floodplain) sands, silts, and clays; 6 – humic sands, silts, and clays of closed and periodically drained depressions; 11 – fluvial-periglacial sands, gravels, and silts; 12 – lacustrine-fluvial (floodplain) sands, silts, and clays.

Ryc. 5. Profil 2 na tle (a) cieniowanego reliefu numerycznego modelu terenu, (b) mapy nachylenia terenu, (c) *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski* w skali 1:50 000, arkusz Orzechów Nowy (715) (Kucharska, 2021), (d) ortofotomapy (opracowanie własne)

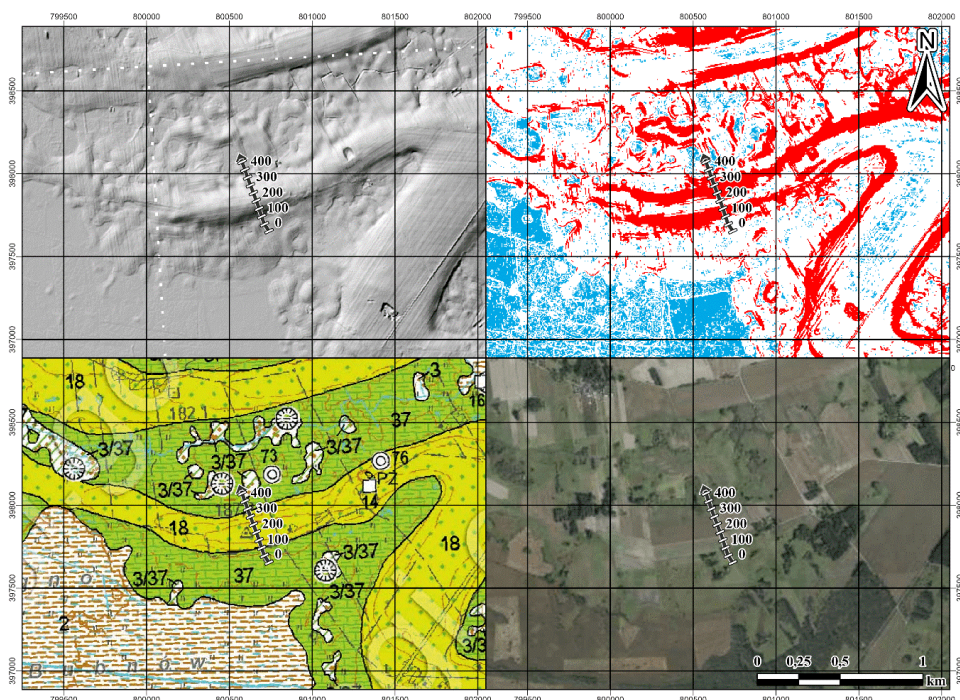
Fig. 5. Profile 2 shown against (a) shaded relief of the digital terrain model, (b) terrain slope map, (c) Detailed Geological Map of Poland at a scale of 1:50,000, Orzechów Nowy sheet (715) (Kucharska, 2021), and (d) orthophotomap (Authors' own elaboration)



Ryc. 6. Profil 2: przekroje rozkładu prędkości fali poprzecznej V_s uzyskane na podstawie badań MASW: (a) na podstawie analizy fal Rayleigha, (b) na podstawie analizy fal Love'a, (c) zintegrowany przekrój V_s uzyskany przez interpolację modeli V_s z niezależnych analiz fal Rayleigha i Love'a, (d) szkic interpretacyjny (opracowanie własne)

Fig. 6. Profile 2: cross-sections of S-wave velocity (V_s) distribution derived from MASW surveys: (a) based on Rayleigh-wave analysis, (b) based on Love-wave analysis, (c) integrated V_s section obtained by interpolation of V_s models derived independently from Rayleigh- and Love-wave analyses, (d) interpretative sketch (Authors' own elaboration)

Profil 3 obejmował formę identyfikowaną jako oz (Pochocka-Szwarc, 2020), leżącą na podłożu (zob. ryc. 7). Analizy z wykorzystaniem obu typów fal dostarczyły zbliżonych wyników wartości V_s , w zakresie 150–600+ m/s. W części środkowej zaznaczyła się strefa obniżonych prędkości (150–220 m/s), odpowiadająca osadom piaszczystym, natomiast w głębszych partiach zarejestrowano wysokie wartości V_s charakterystyczne dla litego podłoża węglanowego. W tym przypadku nie stwierdzono istotnych różnic interpretacyjnych między metodami (zob. ryc. 8).

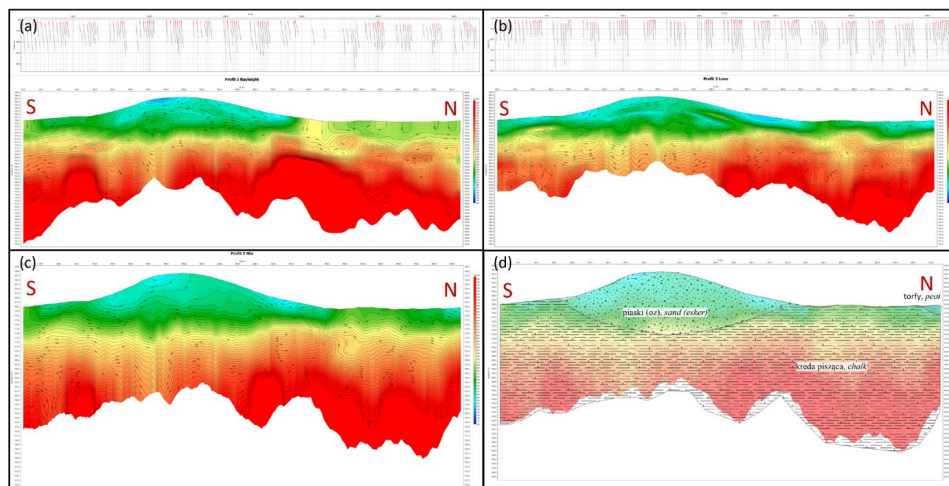


Objaśnienie wydzielen geologicznych: 3 – piaski humusowe, mulki i łył zagłębień bezodpływowych i okresowo przepływowych oraz piaski humusowe, mulki i łył rzeczne; 3/37 – piaski humusowe, mulki i łył na marglach, wapieniach marglistych i kredzie piszącej, ze zwietrzeliną łyłastą; 16 – mulki i piaski jeziorno-peryglacjalne (niweolimniczne); 18 – piaski i żwiru wodnolodowcowe; 37 – margle, wapienie margliste i kreda pisząca, ze zwietrzeliną łyłastą.

Explanation of geological features: 3 – humic sands, silts, and clays of closed and periodically drained depressions, and fluvial humic sands, silts, and clays; 3/37 – humic sands, silts, and clays over marls, marly limestones and writing chalk with clayey weathering cover; 16 – periglacial lacustrine silts and sands (niveolimnic deposits); 18 – glaciofluvial sands and gravels; 37 – marls, marly limestones and writing chalk with clayey weathering cover.

Ryc. 7. Profil 3 na tle (a) cieniowanego reliefu numerycznego modelu terenu, (b) mapy nachylenia terenu, (c) Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, arkusz Kołacze (716) (Pochocka-Szwarc, 2020), (d) ortofotomapy (opracowanie własne)

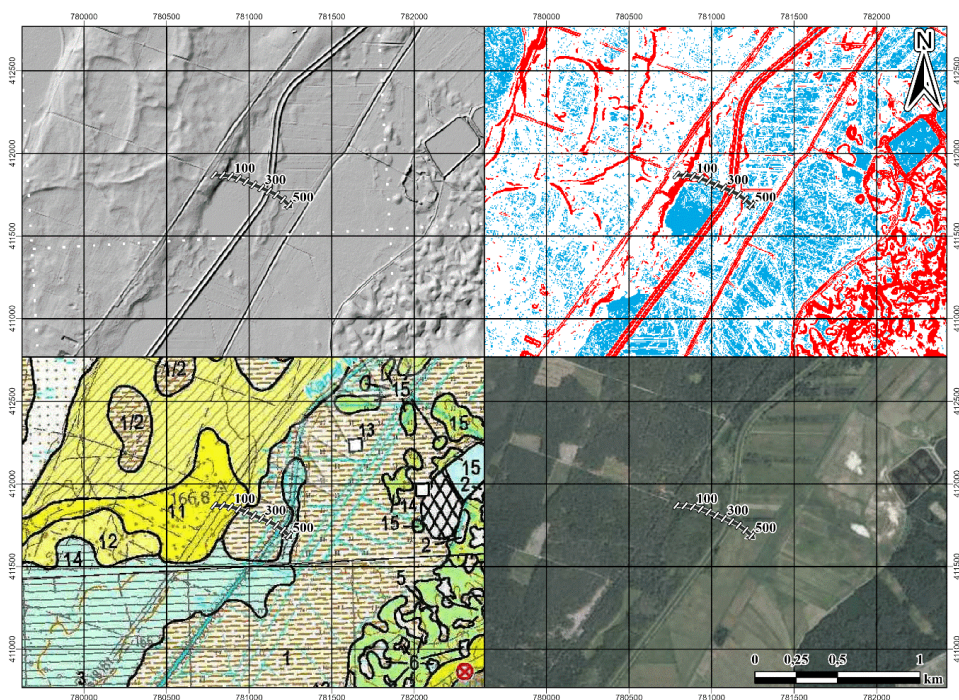
Fig. 7. Profile 3 shown against (a) shaded relief of the digital terrain model, (b) terrain slope map, (c) Detailed Geological Map of Poland at a scale of 1:50,000, Kolacze sheet (716) (Pochocka-Szwarc, 2020), and (d) orthophotomaps (Authors' own elaboration)



Ryc. 8. Profil 3: przekroje rozkładu prędkości fali poprzecznej V_s uzyskane na podstawie badań MASW: (a) na podstawie analizy fal Rayleigha, (b) na podstawie analizy fal Love'a, (c) zintegrowany przekrój V_s uzyskany przez interpolację modeli V_s z niezależnych analiz fal Rayleigha i Love'a, (d) szkic interpretacyjny (opracowanie własne)

Fig. 8. Profile 3: cross-sections of S-wave velocity (V_s) distribution derived from MASW surveys: (a) based on Rayleigh-wave analysis, (b) based on Love-wave analysis, (c) integrated V_s section obtained by interpolation of V_s models derived independently from Rayleigh- and Love-wave analyses, (d) interpretative sketch (Authors' own elaboration)

Profil 4 przebiegał przez najbardziej złożony układ litologiczny, obejmujący piaski, nasypy antropogeniczne, wał kanału Wieprz-Krzna oraz torfowiska (zob. ryc. 9). Analiza z zastosowaniem fal Rayleigha wykazała szeroki zakres prędkości (100–600 m/s) z licznymi strefami obniżonych wartości, natomiast analiza z zastosowaniem fal Love'a zarejestrowała niższe wartości (80–450 m/s), szczególnie w przypowierzchniowych partiach torfowisk. Zestawienie wyników potwierdziło komplementarność obu metod, ujawniając różnice w zasięgu penetracji i czułości na warstwy o niskiej sztywności (zob. ryc. 10).

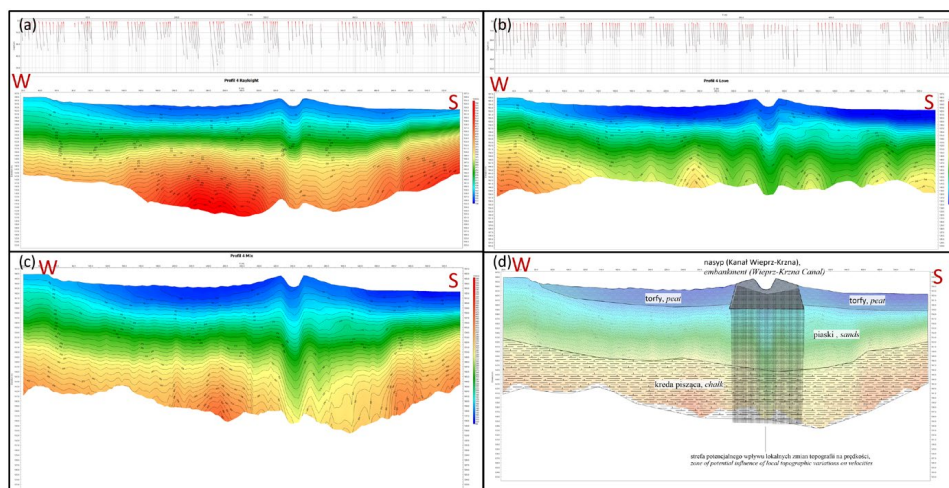


Objaśnienie wydzielen geologicznych: 1 – torfy; 1/2 – torfy na piaskach humusowych, mulkach i ilach zagłębień bezodpływowych; 2 – piaski humusowe, mulki i ropy zagłębień bezodpływowych; 11 – piaski eoliczne w wydmach; 12 – piaski eoliczne; 13 – pyły lessopodobne; 14 – mulki i piaski jeziorne (rozlewiskowe, niweolimniczne); 15 – piaski, piaski pyłowe i mulki rzeczno-peryglacialne (niweofluwialne).

Explanation of geological features: 1 – peat; 1/2 – peat over humic sands, silts, and clays of closed depressions; 2 – humic sands, silts, and clays of closed depressions; 11 – aeolian sands in dunes; 12 – aeolian sands; 13 – loess-like silts; 14 – lacustrine (floodplain) silts and sands (niveolimnic deposits); 15 – fluvial-periglacial sands, silty sands, and silts (niveofluvial deposits).

Ryc. 9. Profil 4 na tle (a) cieniowanego reliefu numerycznego modelu terenu, (b) mapy nachylenia terenu, (c) *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski* w skali 1:50 000, arkusz Sosnowica (679) (Pochocka-Szwarc, 2019), (d) ortofotomapy (opracowanie własne)

Fig. 9. Profile 4 shown against (a) shaded relief of the digital terrain model, (b) terrain slope map, (c) Detailed Geological Map of Poland at a scale of 1:50,000, Sosnowica sheet (679) (Pochocka-Szwarc, 2019), and (d) orthophotomap (Authors' own elaboration)



Ryc. 10. Profil 4: przekroje rozkładu prędkości fali poprzecznej V_s uzyskane na podstawie badań MASW: (a) na podstawie analizy fal Rayleigha, (b) na podstawie analizy fal Love'a, (c) zintegrowany przekrój V_s uzyskany przez interpolację modeli V_s z niezależnych analiz fal Rayleigha i Love'a, (d) szkic interpretacyjny (opracowanie własne)

Fig. 10. Profile 4: cross-sections of S-wave velocity (V_s) distribution derived from MASW surveys: (a) based on Rayleigh-wave analysis, (b) based on Love-wave analysis, (c) integrated V_s section obtained by interpolation of V_s models derived independently from Rayleigh- and Love-wave analyses, (d) interpretative sketch (Authors' own elaboration)

DYSKUSJA

Przeprowadzone badania terenowe pokazują zróżnicowanie prędkości fal poprzecznych (V_s) między profilami, co odzwierciedla lokalne warunki litologiczne oraz właściwości mechaniczne podłoża w warunkach mokradeł Polesia Zachodniego. Należy jednak podkreślić, że wartości V_s nie są bezpośrednim wskaźnikiem litologii, lecz przede wszystkim odzwierciedlają właściwości mechaniczne ośrodka. Z tego względu interpretacja poszczególnych stref prędkościowych wymaga odniesienia do lokalnej budowy geologicznej, warunków geomorfologicznych oraz ciągłości obserwowanych struktur wzdłuż profilu.

W analizowanych danych fale Rayleigha, propagujące się w płaszczyźnie pionowej, charakteryzowały się większym zasięgiem rozpoznania i rejestrowały szerszy zakres prędkości, szczególnie w obrębie podłoża skalnego i związłych osadów mineralnych ($V_s > 500\text{--}600$ m/s). Fale Love'a, rozchodzące się w płaszczyźnie poziomej, wykazywały natomiast większą przydatność w odwzorowaniu warstw o niskiej sztywności, takich jak torfy i osady gytiowe, dla których rejestrowano wartości V_s poniżej 120 m/s. W części analizowanych odcinków zapewniały

również bardziej ciągły przebieg interpretowanego modu podstawowego w obrębie osadów o silnie zróżnicowanych właściwościach.

Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi dla obu typów fal nie powinny być jednak traktowane wyłączenie jako rozbieżność lub błąd metodyczny. Fale Rayleigha i Love'a charakteryzują się odmiennym ruchem cząstek oraz inną wrażliwością na pionowe zmiany właściwości mechanicznych ośrodka, dlatego ich odpowiedź w silnie niejednorodnym profilu może być różna. Zaletą fal Rayleigha w przeprowadzonych badaniach był przede wszystkim większy zasięg rozpoznania i możliwość identyfikacji sztywniejszego podłoża, natomiast ich ograniczeniem była mniejsza czytelność niektórych struktur w obrębie przypowierzchniowych osadów o bardzo niskiej sztywności. Fale Love'a lepiej odwzorowywały część warstw niskoprędkościowych, ale w niektórych lokalizacjach ich użyteczny zasięg głębokościowy był mniejszy. Z tego wynika, że żadnego z zastosowanych typów fal nie można uznać za jednoznacznie korzystniejszy we wszystkich warunkach geologicznych.

W tab. 1 zamieszczono subiektywne podsumowanie jakości uzyskanych danych dla poszczególnych profili. Oceniono ciągłość i spójność danych dla obu typów fal powierzchniowych, co pozwala szybko zidentyfikować obszary, w których interpretacja była bardziej lub mniej pewna. Ocena ta ma charakter jakościowy i nie stanowi niezależnej miary błędu inwersji, lecz służy przede wszystkim porównaniu czytelności i spójności wyników uzyskanych dla fal Rayleigha i Love'a w zróżnicowanych warunkach geologicznych.

Tab. 1. Porównanie wniosków z przeprowadzonych badań (opracowanie własne)

Tab. 1. Comparing the conclusions drawn from the conducted investigations (Authors' own elaboration)

Profil / Profile	Fala Rayleigha / Rayleigh-wave	Fala Love'a / Love-wave	Kluczowe obserwacje / Key observations	Werdykt / Verdict
1	+	–	Rayleigh: szeroki zakres Vs (130–600) Love: niższy zakres (130–280), inwersje prędkości	Lepsza interpretacja z Love'a
2	–	+	Kontrast kreda–torfy, uzupełniające się dane; widoczny powierzchniowy kras kredy pizzącej	Najlepsza kompilacja
3	+	+	Zgodność Rayleigha i Love'a; oz i kreda dobrze widoczne	Wszystkie metody równoważne
4	+	+	Rayleigh głębiej, Love lepiej płycej; widoczne torfy <100 m/s	Kombinacja metod najlepsza

Zróżnicowanie warunków podłoża między profilami potwierdza komplementarność obu metod. W strefach bardziej jednorodnych, reprezentowanych przez profil 3, wyniki uzyskane na podstawie fal Rayleigha i Love'a były w dużej mierze zbieżne. Może to wskazywać, że przy niewielkiej zmienności właściwości mechanicznych oba typy fal odwzorowują podobny układ warstw. Większe różnice

obserwowane w obrębie profili 1, 2 i 4 występowały natomiast w strefach o silniejszych kontrastach właściwości mechanicznych i bardziej złożonej budowie podłoża. W takich warunkach odmienne charakterystyki propagacji i wrażliwości fal Rayleigha i Love'a mogły prowadzić do różnic w uzyskanych modelach Vs.

Wykorzystane w badaniach połączenie obu typów fal nie polegało na wspólnej inwersji krzywych dyspersji. Krzywe fal Rayleigha i Love'a były interpretowane oraz inwertowane niezależnie, a ich wyniki integrowano dopiero na etapie interpolacji modeli Vs do końcowego przekroju dwuwymiarowego. Takie podejście umożliwiło wykorzystanie informacji uzyskanych z obu typów fal bez założenia ich pełnej zgodności. W strefach o silnych kontrastach mechanicznych przekrój zintegrowany stanowił zatem dodatkowy element interpretacyjny, pozwalający zestawzić informacje dotyczące zarówno warstw o niskiej sztywności, jak i położenia sztywniejszego podłoża.

Należy jednocześnie uwzględnić ograniczenia zastosowanej procedury. Analizowano wyłącznie mod podstawowy fal powierzchniowych, a krzywe dyspersji wybierano manualnie na podstawie czytelności i ciągłości pasma energii na obrazie F–V. Ogranicza to wpływ błędnego automatycznego pickingu, ale jednocześnie wprowadza element subiektywności interpretacji. Ponadto zakres częstotliwości wykorzystany do inwersji był dobierany indywidualnie dla poszczególnych rekordów, dlatego głębokość i szczegółowość rozpoznania mogły różnić się lokalnie. Modele fal Rayleigha i Love'a były inwertowane niezależnie, a ich integracja następowała dopiero na etapie interpolacji, dlatego przekroju zintegrowanego nie należy utożsamiać z wynikiem wspólnej inwersji obu typów fal.

Pomimo tych ograniczeń zastosowanie wielokomponentowego podejścia MASW zwiększyło zakres informacji możliwych do uzyskania w warunkach mokradłowych. Zgodność wyników obu typów fal zwiększała wiarygodność interpretacji w strefach jednorodnych, natomiast ich rozbieżności wskazywały obszary wymagające bardziej ostrożnej analizy. W tym sensie równoległe wykorzystanie fal Rayleigha i Love'a może być korzystniejsze niż interpretacja oparta wyłącznie na jednym typie fal, szczególnie w ośrodkach charakteryzujących się znacznymi zmianami sztywności i wysokim uwodnieniem.

Uzyskane wyniki wskazują, że metoda MASW w wersji wielokomponentowej jest skutecznym, nieinwazyjnym narzędziem rozpoznania budowy geologicznej mokradeł. Identyfikacja stref o obniżonej sztywności i geometrii podłoża ma znaczenie dla planowania działań renaturyzacyjnych oraz oceny potencjału retencyjnego torfowisk, szczególnie na obszarach chronionych. Jednocześnie wyniki MASW powinny być interpretowane jako obraz zróżnicowania właściwości mechanicznych podłoża, a nie jako bezpośrednie rozpoznanie litologiczne, co przemawia za ich zestawianiem z dostępnymi danymi geologicznymi i innymi metodami rozpoznania.

WNIOSKI

Zastosowanie wielokomponentowej wersji analizy fal powierzchniowych umożliwiło skuteczne rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej Polesia Zachodniego w warunkach mokradłowych, charakteryzujących się silną heterogenicznością litologiczną oraz wysokim stopniem nasycenia wodą.

Analiza z zastosowaniem fal Rayleigha pozwoliła na uzyskanie przekrojów prędkości fal poprzecznych (V_s) o większym zasięgu penetracji i szerokim zakresie wartości, co było szczególnie przydatne w identyfikacji zwięzłego podłoża mineralnego i węglanowego.

Analiza z zastosowaniem fal Love'a wykazała większą czułość na obecność warstw o niskiej sztywności, takich jak torfy i gytiove osady limniczne, umożliwiając ich lepsze wydzielenie w przypowierzchniowej strefie ośrodka gruntowego.

Zestawienie wyników uzyskanych z obu typów fal pozwoliło na ograniczenie niejednoznaczności interpretacyjnych i uzyskanie bardziej kompletnego obrazu zmienności właściwości mechanicznych podłoża, szczególnie w strefach przejściowych pomiędzy osadami organicznymi, mineralnymi i podłożem skalnym.

Metody sejsmiczne oparte na analizie fal powierzchniowych stanowią wartościowe, nieinwazyjne narzędzie badań geologicznych i środowiskowych na obszarach mokradłowych, w tym na terenach chronionych, gdzie tradycyjne metody rozpoznania są ograniczone.

BIBLIOGRAFIA

- Bałaga, K., Buraczyński, J., Wojtanowicz, J. (1983). Budowa geologiczna i rozwój torfowiska Krowie Bagno (Polesie Lubelskie). *Annales UMCS. Sectio B*, 35–36, 37–62.
- Bałaga, K., Pidek, I.A., Rodzik, J. (1992). Preliminary Studies on Changes Since Late Glacial Times at the Peat Bog Near Moszne Lake (Lublin Polesie, E Poland). *Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel*, 107, 319–330.
- Bałaga, K., Dobrowolski, R., Rodzik, J. (2006). Późnoplejstocenska i holocenska ewolucja torfowiska Durne Bagno (Polesie Lubelskie). *Przegląd Geologiczny*, 54(1), 68–72.
- Chmielewski, T.J., Szymański, J., Weigle, A. (red.). (2020). *Poleski Park Narodowy – dziedzictwo i przyszłość*. Wydawnictwo UMCS.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A. (2004). Geophysical Evidence for Peat Basin Morphology and Stratigraphic Controls on Vegetation Observed in a Northern Peatland. *Journal of Hydrology*, 295(1–4), 173–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.008>
- Dobrowolski, R. (2006). *Glacialna i peryglacialna transformacja rzeźby krasowej północnego przedpola wyżyn lubelsko-wołyńskich*. Wydawnictwo UMCS.
- Dobrowolski, R. (2010). Lubelski kras kredy piszącej i jego specyfika. W: *Materiały 43. Sympozjum Speleologicznego*. Sekcja Speleologiczna Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika.
- Dobrowolski, R., Harasimiuk, M. (2002). Geologiczne uwarunkowania rozwoju rzeźby Polesia. *Acta Agrophysica*, 66, 7–19.

- Foti, S. (2005). Surface Wave Testing for Geotechnical Characterization. W: C.G. Lai, K. Wilmański (Eds.), *Surface Waves in Geomechanics: Direct and Inverse Modelling for Soils and Rocks* (s. 47–71). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/3-211-38065-5_2.
- Foti, S., Hollander, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., Forbriger, T., Hayashi, K., Lunedei, E., Martin, A., Mercerat, D., Ohrnberger, M., Poggi, V., Renalier, F., Sicilia, D., Socco, V. (2018). Guidelines for the Good Practice of Surface Wave Analysis: A Product of the Inter-PACIFIC Project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(6), 2367–2420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii (2025a). *Numeryczny Model Terenu (NMT) – ISOK*, [Zbiór danych], <https://www.geoportal.gov.pl> (dostęp: 3.03.2025).
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii (2025b). *Ortofotomapa*, Geoportal Krajowy [Zbiór danych], <https://www.geoportal.gov.pl> (dostęp: 3.03.2025).
- Harasimiuk, M., Dobrowolski, R. (2010). Geneza krajobrazów hydrogenicznych Polesia Zachodniego. W: T. Chmielewski, D. Piasecki (Eds.), *The Future of Hydrogenic Landscapes in European Biosphere Reserves* (s. 139–162). UP Lublin.
- Harasimiuk, M., Michalczyk, Z., Turczyński, M. (red.). (1998). *Jeziora łączyńsko-włodawskie. Monografia przyrodnicza*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, UMCS, PIOŚ.
- Janiec, B. (1993). Przyrodnicza ocena wpływu kanału Wieprz-Krzna na jakość hydrosfery Pojezierza Łączyńsko-Włodawskiego. *Gospodarka Wodna*, (2), 36–42.
- Janiec, B. (2014). Geneza mis jeziornych Pojezierza Łączyńsko-Włodawskiego: hipotezy a rzeczywistość rozwoju krasu węglanowego. *Przegląd Geologiczny*, 62(5), 257–266.
- Kucharczyk, J., Abramchuk, M., Abramchuk, A., Jabłońska, E. (2025). The Peatlands of Polesie – What Is Left and What Is Lost in Terms of Habitats and Carbon Stores Over the Last 100 Years. *Biodiversity and Conservation*, 34(11), 3715–3731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03128-4>
- Kucharska, M. (2021). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, arkusz 715 – Orzechów Nowy (M-34-23-C)*, PIG–PIB, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0715.jpg (dostęp: 3.09.2026).
- Mażajski, J.A., Rokoczyński, A.N., Wołczek, A.A., Mieszyk, O.P., Jeznach, J. (red.). (2020). *Polesie. Środowisko. Melioracje*. T. 3: *Polesie Polskie*. Wydawnictwo SGGW.
- Michalczyk, Z., Wilgat, T. (1998). *Stosunki wodne Lubelszczyzny*. Wydawnictwo UMCS.
- Michalczyk, Z., Głowacki, S. (2008). Diversification of Water Runoff in Pojezierze Łączyńsko-Włodawskie. *TEKA Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego*, 5, 70–79.
- Michalczyk, Z., Bartoszewski, S., Turczyński, M. (2002). Stosunki wodne Polesia. *Acta Agrophysica*, 66, 49–76.
- Mięsiak-Wójcik, K. (2018). Analysis of Water Retention Changes in Selected Lake-Wetland Catchments of West Polesie. *Limnological Review*, 18(2), 59–75. DOI: <https://doi.org/10.2478/limre-2018-0007>
- Montanarella, L., Jones, R.J.A., Hiederer, R. (2006). The Distribution of Peatland in Europe. *Mires and Peat*, 1, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.19189/001c.130870>
- Ostrowski, S., Pacanowski, G., Majer, E., Sokołowska, M. (2023). *Badania geologiczno-inżynierskie. Geofizyka inżynierska*. PIG–PIB.
- Pezdir, V., Čeru, T., Horn, B., Gosar, M. (2021). Investigating Peatland Stratigraphy and Development of the Šijec Bog (Slovenia) Using Near-Surface Geophysical Methods. *Catena*, 206, artykuł 105484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105484>
- Pochocka-Szwarc, K. (2019). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, arkusz 679 – Sosnowica (M-34-23-A)*, PIG–PIB, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0679.jpg (dostęp: 3.09.2026).

- Pochocka-Szwarc, K. (2020). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, arkusz 716 – Kołacze (M-34-23-D)*, [Mapa geologiczna], PIG–PIB, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0716.jpg (dostęp: 3.09.2026).
- Rix, G.J. (2004). Near-Surface Site Characterization Using Surface Waves. W: C.G. Lai, K. Wilmański (Eds.), *Surface Waves in Geomechanics: Direct and Inverse Modelling for Soils and Rocks* (s. 1–46). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/3-211-38065-5_1
- Wilgat, T., Michalczyk, Z., Turczyński, M., Wojciechowski, K. (1992). Jeziora Łęczyńsko-Włodawskie. *Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej*, 19, 23–140.
- Żarski, M., Morawski, M. (2013). *Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, arkusz 680 – Kaplonosy (M-34-23-B)*, PIG–PIB, https://bazadata.pgi.gov.pl/data/smgp/arkusze_skany/smgp0680.jpg (dostęp: 3.09.2026).

PUBLICATION INFO		
SUBMITTED: 2025.03.06	ACCEPTED: 2026.08.31	PUBLISHED ONLINE: 2026.09.24