

BUDOWA GEOLOGICZNA TERENÓW WODONOŚNYCH UJĘCIA INFILTRACYJNEGO WE WROCŁAWIU

GEOLOGY OF THE AQUIFER AREAS OF AN INDUCED INFILTRATION INTAKE IN THE CITY OF WROCŁAW

JURAND WOJEWODA¹, ALEKSANDER KOWALSKI¹, ROMAN GOTOWAŁA¹, ARTUR SOBCZYK¹

Abstrakt. W pracy przedstawiono wyniki badań geologicznych terenów wodonośnych ujęcia infiltracyjnego MPWiK we Wrocławiu. Na podstawie danych z wierceń i płytkiej prospekcji geofizycznej (GPR) wykonano model 3D warstwy wodonośnej. Rozpoznano architekturę osadów tworzących warstwę. Z występujących na obszarze ujęcia osadów najkorzystniejsze parametry przestrzenno-hydrogeologiczne wykazują żwiry, zalegające bezpośrednio na nieprzepuszczalnym podłożu, najprawdopodobniej osady pre-Odry, które wypełniają kopalne struktury dolinne. Geologiczno-fizjograficzna mapa, wykonana na podstawie numerycznego modelu terenu LiDAR, ujawniła dwa najmłodsze systemy osadów dolinnych, odpowiadających dzisiejszym korytom Odry i Oławy. Osady te mają strukturę typową dla cyklotemów meandrowych, której wykorzystanie może istotnie poprawić efektywność infiltracji wód powierzchniowych do głównych osadów zbiornikowych ujęcia.

Słowa kluczowe: budowa geologiczna i architektura wodonośca, modelowanie 3D, LiDAR, GPR, optymalizacja zasilania.

Abstract. The paper presents the results of geological research in the area of induced infiltration aquifer in the city of Wrocław. Based on drilling and geophysical prospection (GPR) data, a 3D model of the aquifer has been developed, showing the architecture of the aquifer-forming sediments. The best hydrogeological and spatial-related parameters are displayed by gravels directly overlying the impermeable basement represented most likely by pre-Odra River sediments and filling fossil valley structures. A geological-physiographic map, compiled based on the LiDAR digital elevation model, revealed two youngest sedimentary valley systems related to the recent channels of the Odra and Oława rivers. The structure of these deposits is typical of meandering river cyclothems. The use of its anisotropy can significantly improve the efficiency of infiltration of surface water into the water-bearing and conducting gravels that constitute the main usable aquifer.

Key words: aquifer geology and architecture, 3D modelling, LiDAR, GPR, optimisation of water supply.

WSTĘP

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych, prowadzonych na zamówienie MPWiK we Wrocławiu. Celem było odwzorowanie 3D budowy geologicznej obszaru ujęcia infiltracyjnego na terenach wodonośnych Wrocławia, na podstawie których wykonano następnie model hydrogeologiczny (Wcisło i in., 2016). Wyniki badań miały posłużyć optymalizacji systemu zasilania warstwy wodonośnej z powierzchni.

Obszar badań znajduje się we wschodniej części Wrocławia i obejmuje fragmenty dorzecza rzeki Oławy, wyznaczone w czworokącie dzielnic: Nowy Dom, Bierdzany, Książę Małe i Mokry Dwór. Północną granicę obszaru wyznacza lewy brzeg rzeki Odry między Kanałem Opatowickim a Siedlcami. Obszar opracowania ma kształt nieregularnego trójkąta o powierzchni 3,422 km² (fig. 1).

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: jurand.wojewoda@uwr.edu.pl, aleksander.kowalski@uwr.edu.pl, roman.gotowala@uwr.edu.pl, artur.sobczyk@uwr.edu.pl.

Budowa geologiczna obszaru ujęć jest jednolita. Podłoże podkenozoiczne na głębokości ok. 45 m tworzą utwory triasu – wapień muszlowy oraz kajper, heterolityczna seria skał okrucowych z wkładkami dolomitów (Goldsztejn, 2009). Powierzchnia stropowa utworów trzeciorzędu, udokumentowana w pojedynczych otworach, występuje na rzędnej 65–69 m n.p.m. Lokalnie, w części zachodniej obszaru (Brochów), powierzchnia ta występuje znacznie wyżej, tzn. na rzędnej 90–100 m n.p.m. Na powierzchni obszaru występują piaski, żwiry, mady rzeczne oraz torfy i muły holocenu, jako najmłodsze ogniwa wypełnień doliny Odry na tym obszarze (Goldsztejn, 2009).

Ujęcie w rejonie Mokrego Dworu powstało na przełomie XIX i XX w., kiedy znacznie wzrosło zapotrzebowanie Wrocławia na wodę pitną. Pierwszą dokumentację budowy geo-

logicznej wykonano w latach 1883–1886. Pierwsze studnie oddawano sukcesywnie do 1904 r. Kolejne studnie powstały w latach 1920–1939. Infrastruktura transportowo-uzdatniająca wodę powstawała w latach 1902–1939. Mapa topograficzna z 1942 r. (arkusz 4968 Breslau Süd 1:25 000) ukazuje obszar ujęcia wody w pełni ukończonego (fig. 2).

Od 1971 r. obszar ujęcia wody jest zasilany dodatkowo z powierzchni przez kanał przerzutowy Nysa–Oława. Jednocześnie od 1982 r. zakład produkcji wody „Na Grobli” jest wspomagany przez nowoczesny obiekt „Mokry Dwór”. Obecnie zarówno na terenach wodonośnych, jak i w obrębie zakładu „Na Grobli” trwają szeroko zakrojone prace modernizacyjne, które mają na celu optymalizację procesów infiltracji, transportu i uzdatniania wody dla miasta Wrocławia.

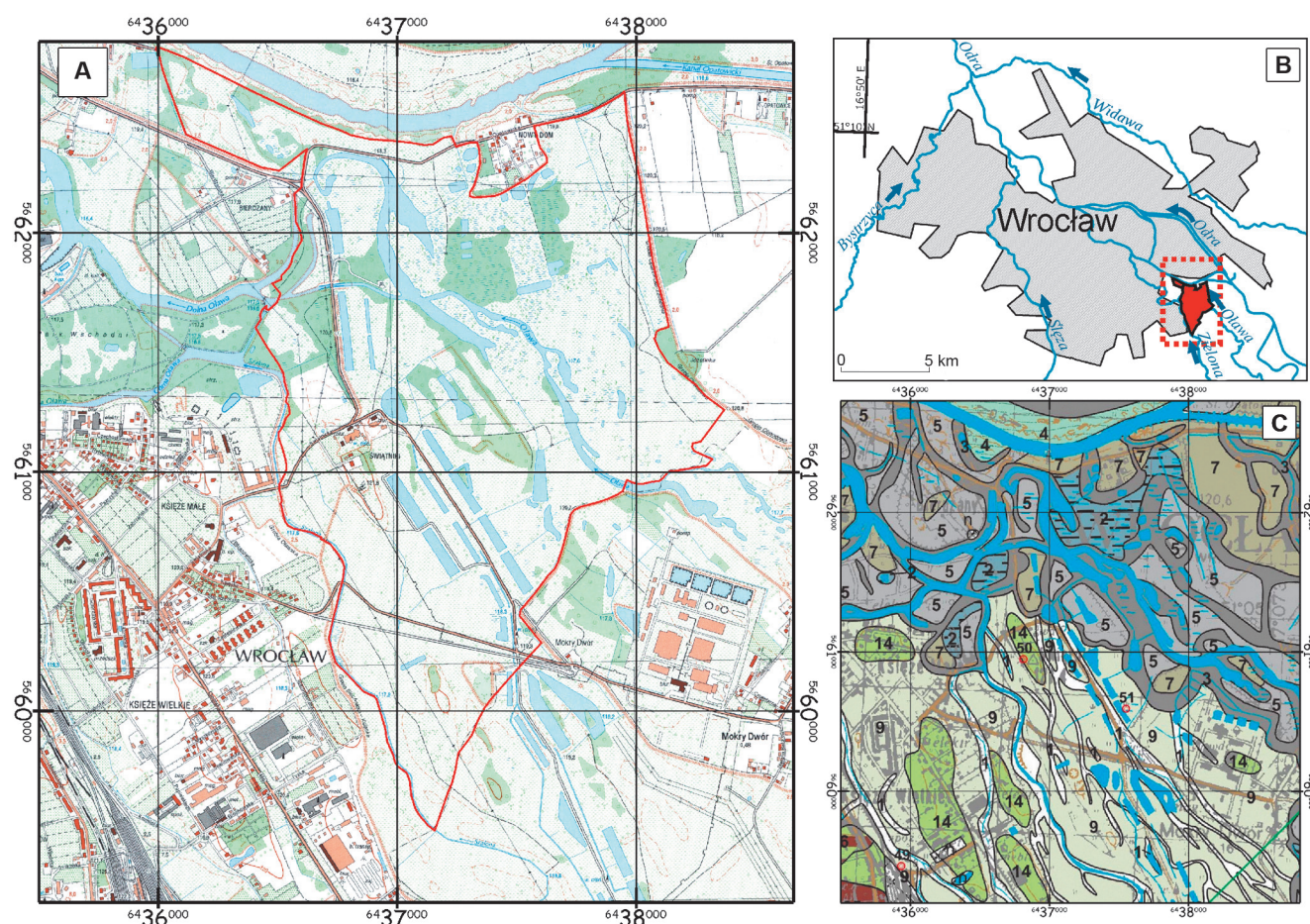


Fig. 1. A. Mapa topograficzna obszaru badań w odwzorowaniu PUWG92/19 (1998 r.); fragmenty ark. M-33-35-C-a-4, M-33-35-C-d-1, M-33-35-C-c-2, M-33-35-C-b-3. Nalozona siatka współrzędnych PUWG2000/strefa6. B. Szkic lokalizacyjny obszaru badań. C. Budowa geologiczna obszaru badań. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Wrocław (764) (autor J. Badura, D. Ciszek), reambulacja 2013. PIG Wrocław. Nalozona siatka współrzędnych PUWG 2000/strefa 6

1, 4, 7, 9, 14 – piaski i żwiry rzeczne; 2, 3, 5, 10 – muły; 6 – gliny lodowcowe

A. Topographic map of the study area in PUWG92/19 (1998) projection; parts of M-33-35-C-a-4, M-33-35-C-d-1, M-33-35-C-c-2 and M-33-35-C-b-3 map sheets. PUWG2000/zone 6 coordinates are superimposed. B. Location of the study area. C. Geological setting of the study area. Detailed Geological Map of Poland at a scale of 1:50,000, sheet Wrocław (764), sheet updated in 2013. Polish Geological Institute in Wrocław. PUWG2000/zone 6 coordinates are superimposed

1, 4, 7, 9, 14 – fluvial sands and gravels; 2, 3, 5, 10 – muds; 6 – glacial tills

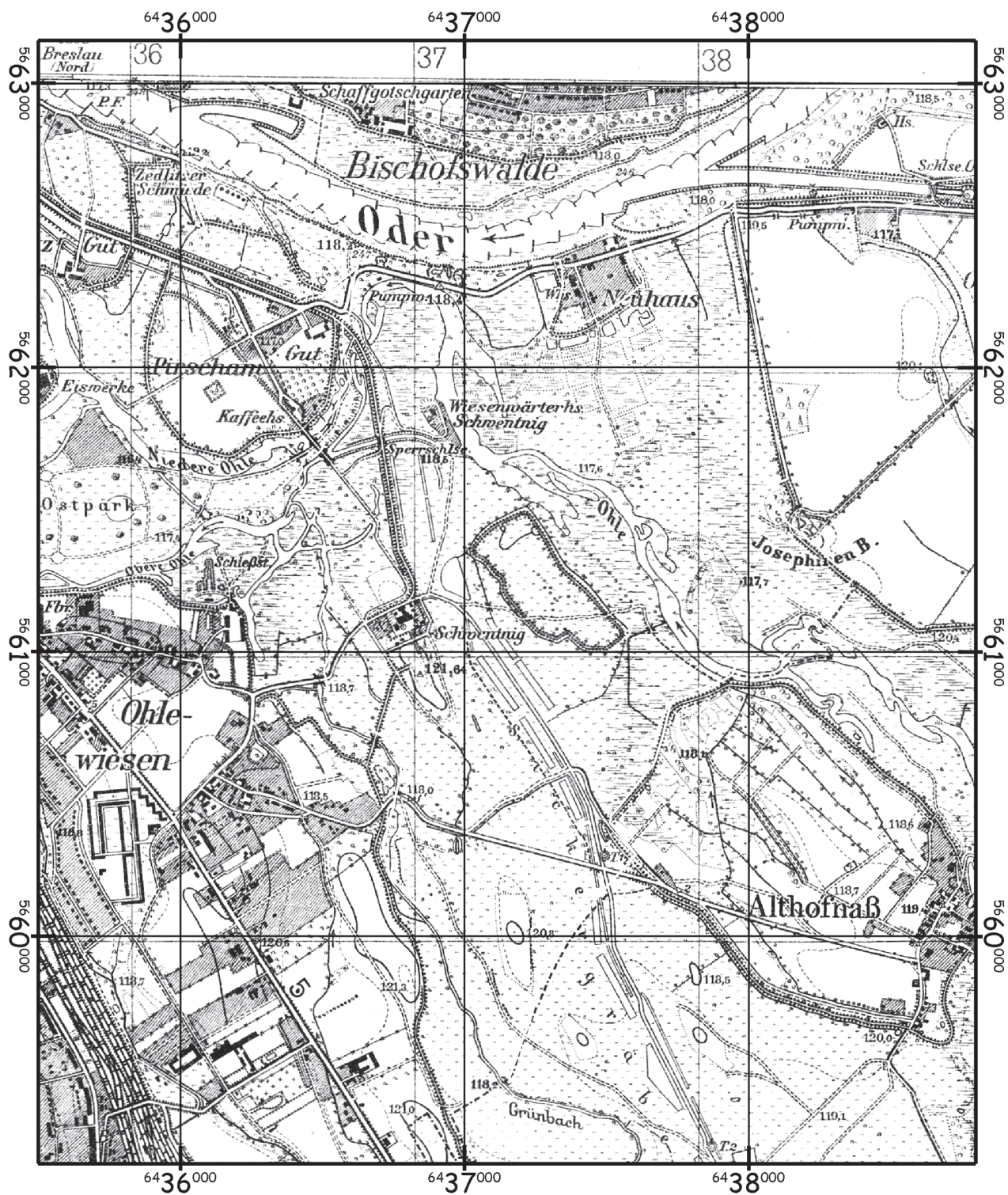


Fig. 2. Sytuacja topograficzna obszaru badań w odwzorowaniu mapy topograficznej 1:25000 z 1942 r.
Topographische Karte 1:25000, 4968 Breslau Süd, 1942. Nalozona siatka współrzędnych PUWG2000/strefa 6

Topographic map of the study area at a scale of 1:25,000 (1942). Topographische Karte 1:25,000, 4968 Breslau Süd, 1942.
PUWG2000/zone 6 coordinates are superimposed

MATERIAŁY WYJŚCIOWE I ZASTOSOWANE OPROGRAMOWANIE

DANE Z WIERCEŃ ARCHIWALNYCH

Na potrzeby realizacji projektu przeanalizowano dane otworowe dostępne w dokumentacjach geologicznych i hydrogeologicznych archiwum Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji (MPWiK) we Wrocławiu oraz w systemach baz numerycznych Centralnego Banku Danych Hydrogeologicznych HYDRO (CBDH) i Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich PIG-PIB (Goldsztejn, 2009).

Z wielu przeanalizowanych profili otworów wiertniczych do ostatecznego wykorzystania w realizowanym projekcie wybrano 215 dowierconych co najmniej do głębokości powierzchni stropowej tzw. gliny szarej, która stanowi warstwę nieprzepuszczalną w górotworze poniżej ujętego poziomu wodonośnego.

Głębokość przeanalizowanych otworów wiertniczych (przeważnie studziennych) waha się w przedziale od 9 do 20 m, jedynie 2 otwory należą do grupy głębokich otworów badawczych: otwór 29A2038 (111,5 m) oraz otwór 29H001 (193 m) (dane pozyskane z Bazy Danych Geologiczno-Inżynierskich PIG-PIB). Łączny metraż przeanalizowanych otworów wynosi 2848,6 m. Do konstrukcji modelu wykorzystano dane z 215 otworów wiertniczych. Strop gliny szarej nawiercono w 200 otworach. Dla otworów wykonano transformację współrzędnych do jednego wspólnego układu, jakim jest PUWG2000/strefa 6. W układzie tym opracowano również wszystkie zestawienia materiałów dokumentacyjnych oraz wynikowe materiały graficzne – mapy sumaryczne i warstwy.

Procedurą wstępną, przed wykorzystaniem materiałów z archiwalnych otworów wiertniczych, była weryfikacja i uporządkowanie informacji podstawowej, tzn. lokalizacji otworu i jego nazwy. Ten konieczny zabieg był podyktowany różnicami w położeniu tych samych otworów publikowanych w różnych źródłach oraz różnym nazewnictwem lub symbolami przypisanymi do tych samych otworów w zależności od źródła pochodzenia informacji. W związku z rozbieżnościami w numeracji otworów, pochodzących z różnych dokumentacji i baz danych oraz brakiem unikatowego identyfikatora otworu warunkującego prawidłowe zarządzanie informacją w systemie GIS, na potrzeby projektu przyjęto ujednolicony system nazwy otworu.

DOKUMENTACJE, OPRACOWANIA BADAWCZE I PRACE PUBLIKOWANE

Przy realizacji projektu, poza archiwalnymi wynikami wierceń, wykorzystano również liczne opracowania dokumentacyjne i badawcze – głównie w zakresie załączonych map i przekrojów. Z publikowanych prac wykorzystano głównie opracowane mapy geologiczne Wrocławia w skali 1:50 000 (Badura, Ciszek, 2013). Jako podkłady topograficzne w opracowaniu wykorzystano cztery arkusze (M-33-35-C-a-4, M-33-35-C-d-1, M-33-35-C-c-2, M-33-35-

-C-b-3) Topograficznej Mapy Polski w skali 1:10 000, arkusze Wrocław w układzie współrzędnych PUWG92/19, po ich transformacji do układu PUWG2000/6. Przeanalizowano również przedwojenne mapy topograficzne: arkusz 424 Breslau 1:100 000 (1912) oraz arkusz 4968 Breslau Süd 1:25 000 (1942). Wykorzystano również dane wysokościowe ASCII XYZ z NMT – LiDAR (dane z pokrycia 6 arkuszami w skali 1:5000) i ortofotomapę Wrocław (naloty z dnia 5–6 czerwca 2015, rozdzielczości terenowa ortofotomapy 5 cm/pixel; Ortofotomapa, 2015). Model topografii terenu wygenerowany z tych danych jako obraz rastra wysokościowego TIFF również transformowano do układu współrzędnych PUWG2000/6 (fig. 3). Do celów realizacji projektu, materiały kartograficzne udostępniło MPWiK we Wrocławiu.

ZASTOSOWANE OPROGRAMOWANIE

Przy realizacji projektu, poza wcześniej wspomnianym oprogramowaniem specjalistycznym Prism 2,5 (GPR), wykorzystano oprogramowanie komputerowe z zakresu gromadzenia danych i zarządzania informacją (Microsoft Office Excel, Microsoft Visual FoxPro, PostgreSQL) oraz specjalistyczne oprogramowanie do zarządzania informacją przestrzenną GIS, edycją kartograficzną i modelowaniem przestrzennym (TNTmips MicroImages, Surfer Golden Software, MGE Intergraph, Move 2015.2 (Midland Valley). Wymianę danych między programami realizowano w formatach DBF, XLS, DAT, CSV, natomiast wyniki edycji kartograficznej i modelowania geologicznego eksportowano w formatach: wektorowym – SHP i rastrowym – TIFF i JPG (z georeferencją).

BAZA DANYCH

Istotnym elementem w trakcie realizacji projektu było stworzenie numerycznej bazy danych z otworów wiertniczych, poprzedzone ich selekcją, uporządkowaniem, ujednoliceniem i ujęciem w schematy czytelne do efektywnego wykorzystania przez numeryczne narzędzia analityczne i systemy modelowania przestrzennego.

Dla danych otworowych stworzono strukturę pozyskanych informacji z kart otworów w postaci dwóch głównych tabel (informacje o otworze oraz informacje o wydzieleniach litologicznych i parametrach geologicznych). Obie tabele są ze sobą relacyjnie powiązane systemem wiele do jednego (wiele rekordów litologicznych – jeden rekord stanowiący jeden otwór).

Dla każdego wydzielenia opisywanego na karcie otworu wyznaczono rzędną terenu i skrótowy opis litologii oraz wprowadzono informacje dotyczące frakcji osadu, domieszek oraz barwy. Uwzględniono również informacje dotyczące litologii (np. zawartości materii organicznej, poziomów glebowych, stopnia plastyczności glin i ilów). W przypadku braku informacji o frakcji osadu w karcie



Fig. 3. Lidarowy, numeryczny model wysokościowy obszaru badań o rozdzielczości ok. 1×1 m w projekcji PUWG92/19; fragmenty arkuszy M-33-35-C-a-4-3, M-33-35-C-a-4-4, M-33-35-C-c-2-1, M-33-35-C-c-2-2. Nałożona siatka współrzędnych PUWG2000/strefa6

LiDAR Digital Elevation Model (DEM) of the study area with *ca.* 1×1 m resolution in PUWG92/19 projection; parts of M-33-35-C-a-4-3, M-33-35-C-a-4-4, M-33-35-C-c-2-1 and M-33-35-C-c-2-2 map sheets. PUWG2000/zone 6 coordinates are superimposed

otworu wiertniczego, przyjęto parametry uśrednione (w przypadku opisu piasku bez podania frakcji – piasek średnioziarnisty, żwiru – żwir średnioziarnisty). W dokumentacjach geologiczno-inżynierskich i kartach otworów bardzo często stosowano określenie „pospółka” w odniesieniu do osadów wielofrakcyjnych, zawierających od 10 do

50% frakcji żwirowej przy pozostałym udziale frakcji piaskowej. Dla utworów tych przyjęto parametr uśredniony żwiru drobnego. Zagadnienie utworów o nazwie pospółka jest wyjaśnione w dalszej części artykułu. Uproszczenia były konieczne do wykonania modelu geologicznego i cięć poziomych rozkładu parametru uziarnienia.

BADANIA GEORADAROWE SERII WODONOŚNEJ OSADÓW CZWARTORZĘDOWYCH NA OBSZARZE UJĘCIA

SPRZĘT POMIAROWY

Badania geofizyczne wykonano przy użyciu georadaru Cobra Plug-In GPR szwedzkiej firmy Radarteam Sweden AB, wyposażonego w jednostkę sterującą Mesa Rugged Notepad™ pracującą na systemie operacyjnym Windows® 6.5 z wbudowanym systemem pozycjonowania GPS (moduł u-blox). Sondowania prowadzono przy użyciu anteny nieekranowanej Sub-Echo 40 o częstotliwości centralnej 52 MHz, która wykorzystuje technologię sondowania w czasie rzeczywistym (ang. *real time sampling*) o liczbie złożów 64 000/s oraz TWT (ang. *two-way travel time*) równym 1600 ns. Zastosowane rozwiązanie prowadzi do podwojenia zakresu wgłębnej penetracji georadaru w stosunku do klasycznej metody sondowania sekwencyjnego (ang. *sequential sampling*), co w sprzyjających warunkach dla anteny Sub-Echo 40 umożliwia uzyskanie zakresu głębokościowego rzędu 100–120 m p.p.t. (por. Cobra Plug-In GPR User Manual, 2014).

METODY I MATERIAŁY BADAWCZE

Zastosowana metoda georadarowa (por. Daniels, 2004) należy do grupy płytkiej prospekcji geofizycznej, które umożliwiają nieinwazyjne rozpoznawanie struktury przypowierzchniowych warstw gruntu. Metoda ta znalazła zastosowanie m.in. w hydrogeologii przy rozpoznaniu stratygrafii czwartorzędowych osadów rzecznych (Neal, 2004; Bowling i in., 2005; Doetsch i in., 2012; Żuk, Smith, 2015), charakterystyce zwierciadła wód podziemnych (Endres i in., 2000; Igel i in., 2013; Gańko i in., 2015) oraz modelowaniu krążenia wód podziemnych (por. Doolittle i in., 2006; Manu i in., 2014). Istotną rolę w badaniach georadarowych odgrywa właściwy dobór parametrów pomiarowych (por. Karczewski i in., 2011), które wykonane na wstępnym etapie planowania prac terenowych umożliwiają późniejszą kontrolę jakości zarejestrowanych echogramów. Szczególnie przydatne w tym względzie są dane z otworów wiertniczych, które

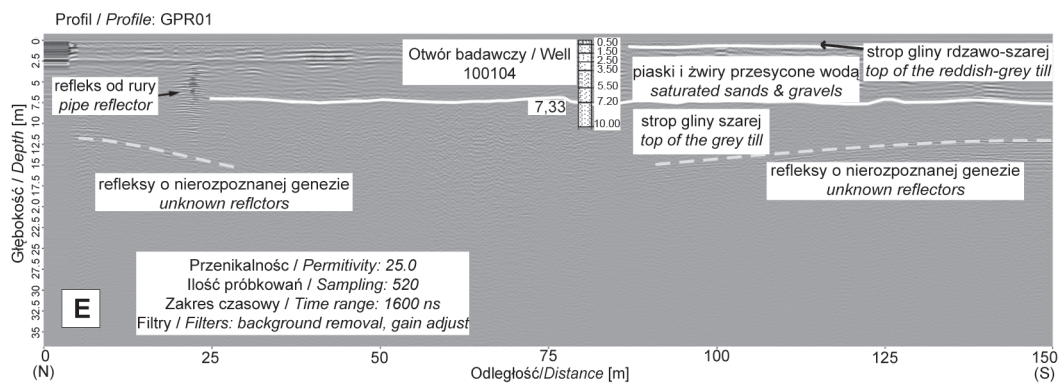
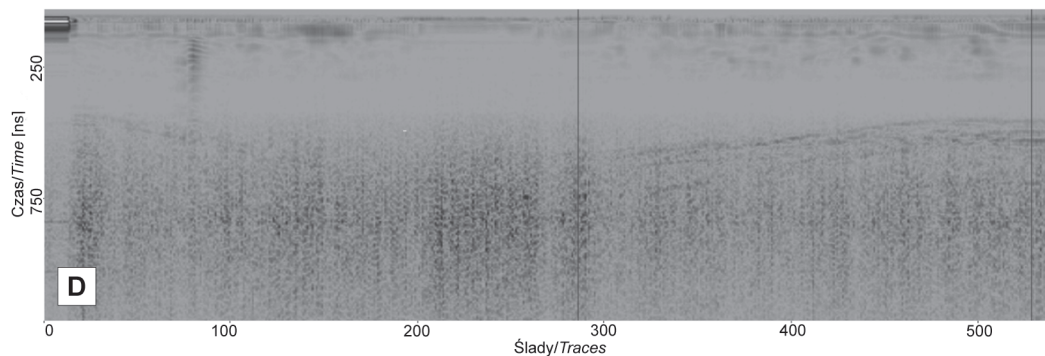
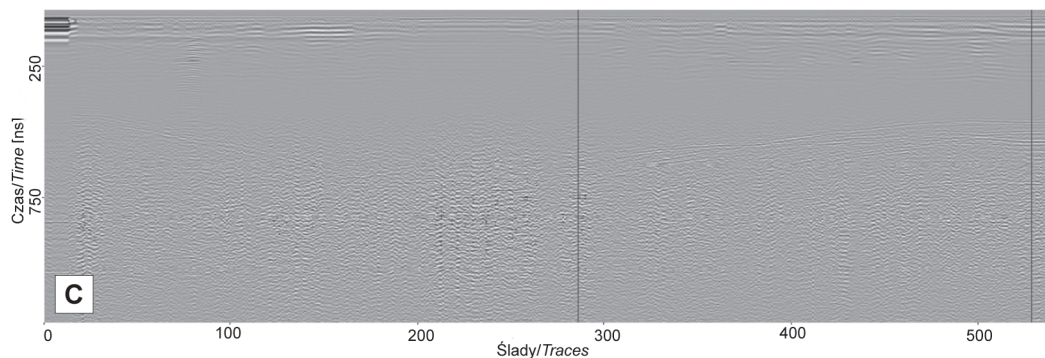
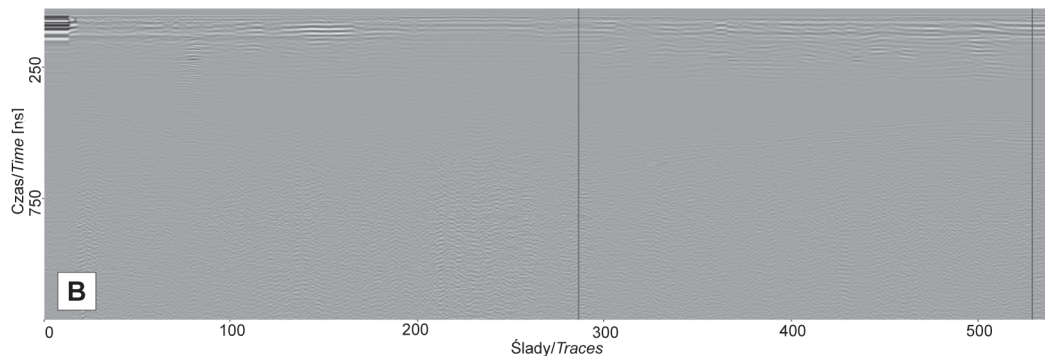
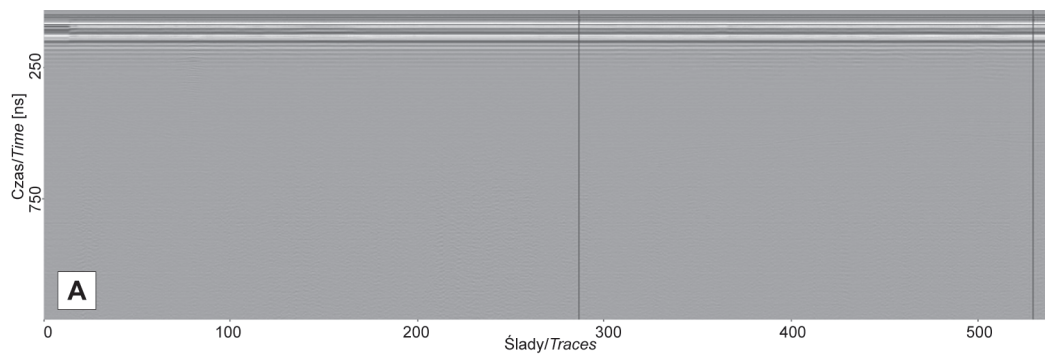
w znacznym stopniu ułatwiają dobór właściwych parametrów sondowania na etapie planowania prac geofizycznych oraz późniejszą korelację zobrazowanych refleksów elektromagnetycznych z poszczególnymi horyzontami hydrogeologicznymi. W tym celu, w rejonie otworu wiertniczego P1 100102, wykonanego w październiku 2015 r., wykonano kilkanaście testowych profili georadarowych na tej samej stałej trasie przy użyciu różnych wartości parametru stałej dielektrycznej (ang. *permittivity*), która bezpośrednio wpływa na opóźnienie czasowe rejestrowanego sygnału falowego. Na podstawie uzyskanych wyników ustalono, że na potrzeby planowanych badań georadarowych optymalne rezultaty są uzyskiwane przy zastosowaniu stałej dielektrycznej o wartości 25 (por. Daniels, 2004, s. 90), która pod względem geologicznym odpowiada przesyconej glinie piaszczystej (ang. *saturated sandy loam*). Zastosowanie powyższych ustawień skutkuje uzyskiwaniem wartości maksymalnej wgłębnej penetracji fal elektromagnetycznych na poziomie 45 m p.p.t., przy jednoczesnym zwiększeniu rozdzielczości poziomej danych GPR w płytkich horyzontach położonych do 20 m p.p.t. Zgodnie z zaleceniami producenta georadaru Cobra Plug-In GPR (por. Cobra Plug-In GPR User Manual, 2014), liczbę indywidualnych próbkowań zdefiniowano na 512, a zakres czasowy pasma (ang. *time range*) ustalono na poziomie 1600 ns, co umożliwia uzyskiwanie największego spektrum częstotliwościowego emitowanej fali elektromagnetycznej. Każdorazowo uzyskane obrazy georadarowe były poddawane procedurze filtracji, a następnie interpretacji z uwzględnieniem danych na temat budowy geologicznej stanowiska pomiarowego. Skalę pionową wyrażono w metrach po automatycznym przeliczeniu w oprogramowaniu Prism2, opartym na algorytmie TWT (ang. *two-way travel time*), skalę poziomą wyrażono w metrach na podstawie danych GPS z jednostki sterującej Mesa Rugged Notepad™. Proces przetwarzania danych georadarowych, począwszy od wejściowego echogramu zawierającego surowe dane geofizyczne do zinterpretowanego profilu, zaprezentowano na figurze 4.

Fig. 4. Procedura filtrowania i interpretacji danych georadarowych

A – surowy radarogram, skala pionowa – czas (ns), skala pozioma – ilość śladów (*traces*); B – radarogram po zastosowaniu filtra *background removal*, który usuwa stałe zaburzenia nieprzetworzonego sygnału, często wykształcone w postaci równoległych refleksów widocznych w formie pasów w górnej części ryciny A; C – korekta wzmocnienia (*gain function*) polegająca na normowaniu amplitudy do stałego poziomu w oknie o zadanej długości, w tym przypadku wzmocniono poziomy 250 i 750 ns w celu uwypuklenia stref odbicia; D – *filtr envelope*, który jest przykładem transformaty Hilberta, pozwalającej uwypuklić najważniejsze kontrasty dla fali radarowej, co może wpłynąć na poprawę rozdzielczości obrazu; E – profil GPR_01 po wykonaniu interpretacji i zestawieniu z danymi z otworu wiertniczego 100104; skala pionowa – głębokość (m), skala pozioma – odległość (m), obie dane uzyskane po transformacji

Workflow procedure for ground penetrating radar data filtering and interpretation

A – raw radargram, vertical scale – time (ns), horizontal scale – number of traces; B – radargram after background removal filtering, which removes noises from the unprocessed signal, frequently visualized as parallel signal reflections to be observed in the upper part of Fig. A; C – gain function resulting in amplitude normalization based on fixed window size, in this case 250 and 750 ns horizons have been amplified for presenting reflections; D – envelope filtering belonging to Hilbert transform operator, which allows highlighting the most important contrasts of the radar wave and might result in improving the final image resolution; E – GPR_01 profile after interpretation and data calibration from well 100104; vertical scale – depth (m), horizontal scale – distance (m), both values obtained after transformation



WYNIKI PROSPEKCJI GPR

Sondowania georadarowe wykonano w kilku różnych lokalizacjach obszaru badań, które cechowały się zmiennością warunków hydrogeologicznych, różnicami w budowie geologicznej, a ponadto zostały rozpoznane przy pomocy płytkich otworów wiertniczych. W trakcie prac terenowych wykonano 30 profili georadarowych o długości od 86 do 764 m każdy. Do dalszej interpretacji wytypowano 15 echogramów georadarowych, przy czym kryterium kwalifikacyjne oparto na dwóch założeniach: (1) obraz georadarowy cechuje się obecnością widocznych wgłębnych poziomów refleksyjnych, oraz (2) lokalizacja profilu umożliwia przybliżoną kalibrację głębokościową w odniesieniu do danych otworowych. Sumaryczna długość wszystkich wykonanych echogramów GPR wyniosła 8392 metry, z czego długość 15 profili poddanych procedurze interpretacji stanowi 4040 metrów. Interpretację profili georadarowych dokonano przy użyciu przeznaczonego do georadaru Cobra Plug-In oprogramowania Prism 2 (wersja jądra 60.02.RT) łotewskiej firmy Radar Systems Inc. Wykonane profile georadarowe są zlokalizowane w kilku strefach terenu badań, na NE – profile GPR01–GPR02, na E – od GPR03 do GPR08, na SW – od GPR09 do GPR15, na W – od GPR16 do GPR19 i od GPR22 do GPR29, na NW – GPR20 do GPR21 oraz w centralnej części obszaru – profil GPR30. Wykonane echogramy po przeprowadzeniu korelacji z danymi wiertniczymi okazały się przydatne do rozpoznania wewnętrznej struktury osadów czwartorzędowych, w tym wskazania stropu plejstoceńskiej gliny szarej stanowiącej ważny poziom nieprzepuszczalny (półprzepuszczalny?) na badanym obszarze.

KORELACJA DANYCH OTWOROWYCH Z ECHOGRAMAMI GPR

Metoda georadarowa okazała się skutecznym narzędziem. Wyniki badań wskazują jednak, że w kilku przypadkach przyjęte wstępne parametry stałej dielektrycznej na poziomie 25 wymagały korekty na etapie interpretacji danych. Sytuacja ta dotyczy zwłaszcza profili GPR09 oraz GPR12, które znajdują się w południowo-zachodniej części

obszaru badań (fig. 5). Dla tych lokalizacji, na etapie interpretacji, po wykonaniu korelacji z danymi z otworów wiertniczych, zastosowana stała dielektryczna wyniosła 70, co odpowiada wartościom typowym dla torfowisk lub stref silnie zawodnionych (Neal, 2004). Sytuacja ta jest podyktowana prawdopodobnie bardzo wysokim przesyleniem wodą osadów piaszczysto-żwirowych (tzw. pospółka, współczynnik filtracji k ok. 40 m/d) budujących tę część obszaru badań, co wpływa na znaczne zwiększenie przenikalności fal elektromagnetycznych lub/i występowaniem bliżej nierozpoznanych głębszych poziomów refleksyjnych. Widoczna znaczna zmienność pionowa na krótkich dystansach w przebiegu przypuszczalnych granic geologicznych wydzielanych na radarogramach (profile GPR11, 18, 28) może być częściowo następstwem dużej zmienności rozkładu stałej dielektrycznej w gruncie. Zjawisko to jest znane w sejsmice pod pojęciem „*velocity pull-up/pull-down effect*”, a w metodzie georadarowej może być odpowiedzialne za zmianę położenia granicy osadów nawet o 30% w stosunku do jej rzeczywistej pozycji (Leckebusch, 2007). Z kolei na profilach GPR09, 12, 17 wyróżniono również strefy występowania obszarów o hiperbolicznym kształcie refleksów, które zazwyczaj są związane z występowaniem pod powierzchnią terenu różnorodnej infrastruktury przesyłowej m.in. w postaci rur (por. Karczewski i in., 2011).

Przeprowadzona interpretacja echogramów georadarowych umożliwiła częściowe zrekonstruowanie zmienności przestrzennej w przebiegu powierzchni stropu gliny szarej. Najlepsze rezultaty wyrażone graficzną prezentacją na echogramie przebiegu stropu wspomnianej formacji po uwzględnieniu danych otworowych uzyskano dla profili GPR01, 09, 12 oraz 17 (por. fig. 5). Rozciągłość pozioma wyznaczonej w ten sposób linii stropu gliny szarej wynosi 100 m dla profilu GPR01 oraz GPR17, 250 m – dla GPR09 oraz 380 m – dla GPR12. Uzyskane wyniki pozwoliły ponadto na wskazanie głębiej położonych horyzontów refleksyjnych, sięgających miejscami 25 m p.p.t. (GPR05). Dokładne wskazanie ich genezy pozostaje jednak na tym etapie niemożliwe, głównie ze względu na brak niezależnych danych dokumentujących budowę geologiczną tego poziomu głębokościowego.

MODEL I MAPA POZIOMICOWA STROPU GLINY SZAREJ

Mapę poziomicową oraz trójwymiarowy model stropu gliny szarej (spągu warstwy wodonośnej) skonstruowano na podstawie danych pochodzących z otworów wiertniczych

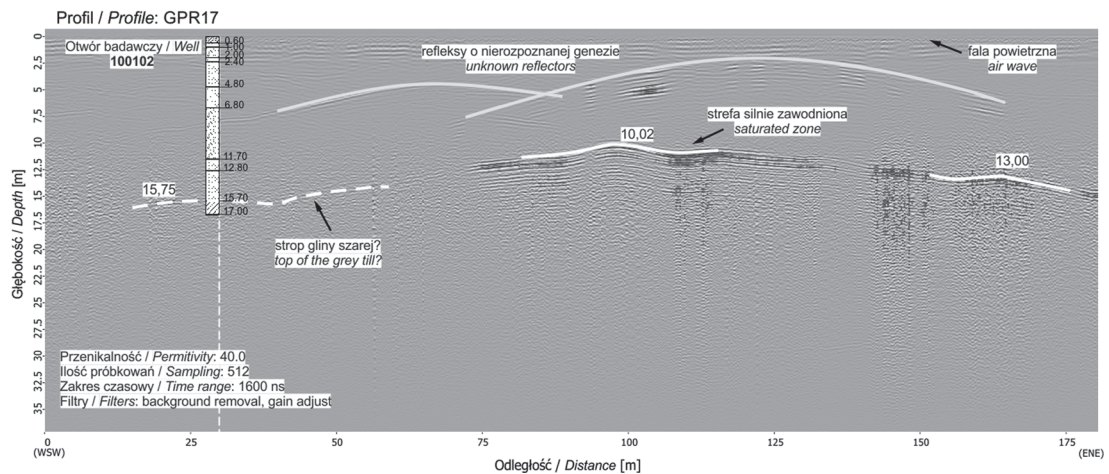
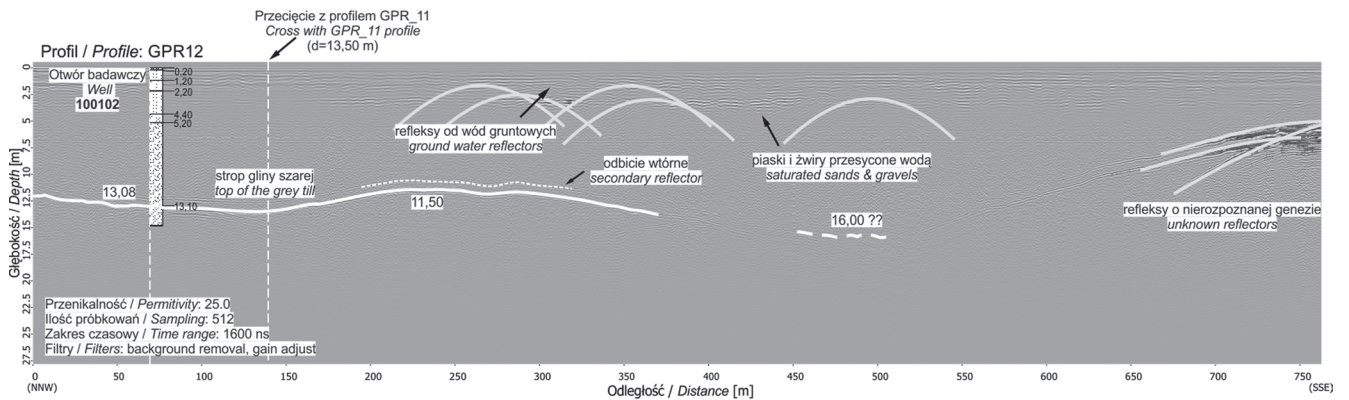
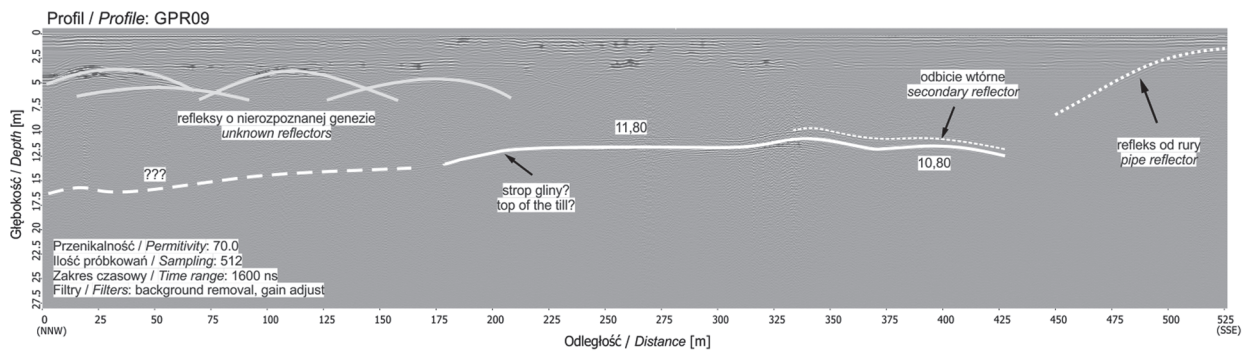
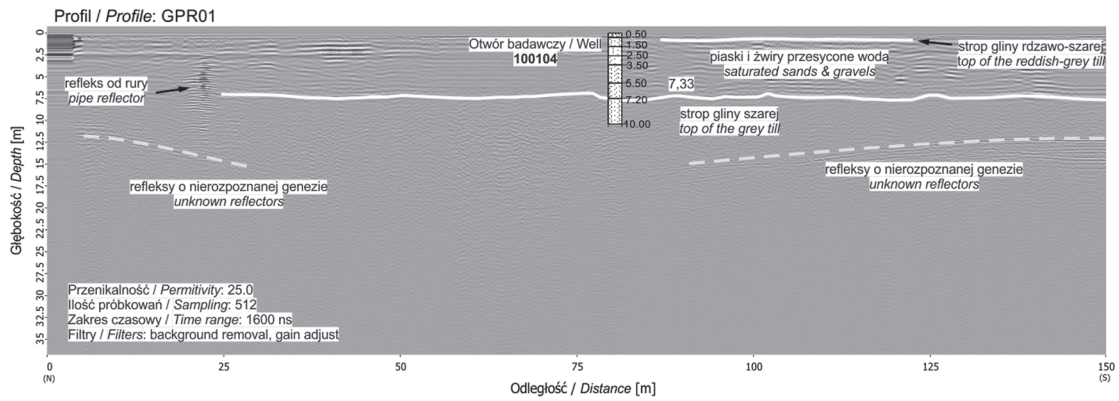
oraz wykonanych profili georadarowych (fig. 6). Z kart otworów wiertniczych pozyskano informacje o głębokości występowania stropu gliny szarej, a następnie w bazie da-

Fig. 5. Profile georadarowe nr 01, 09, 12, 17 obrazujące zmienność w rozkładzie horyzontu glin polodowcowych oraz strefy refleksów o nierozpoznanej genezie

Prezentowane wartości liczbowe (białe pola) wskazują wynikową głębokość w metrach p.p.t. danego horyzontu na podstawie danych geofizycznych po zastosowaniu konwersji czas–głębokość. Podstawowe parametry sondowania i filtracji danych wskazano w lewym dolnym rogu

Georadar profiles no. 01, 09, 12 and 17 depicting spatial variability in the distribution of the glacial till horizon as well as the areas with reflectors of unknown origin

Presented values (white boxes) refer to depths of the horizons in metres b.g.l. and are based on depth-converted geophysical data. Primary sounding and filtering parameters are shown in the left-down corner



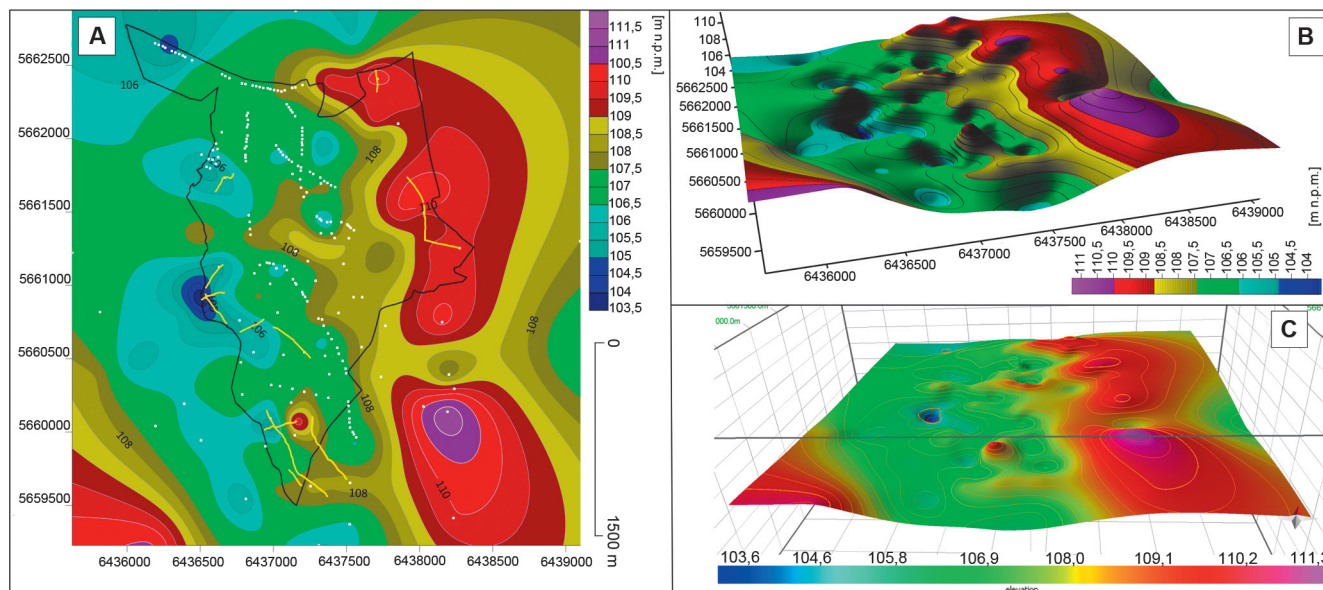


Fig. 6. A. Mapa poziomicowa stropu gliny szarej. Na mapie zaznaczono profile georadarowe (żółte linie) oraz otwory wiertnicze (punkty), które użyto do wygenerowania modelu. B, C. Trójwymiarowe modele stropu gliny szarej wygenerowane w oprogramowaniu Surfer 9.0 (Golden Software) i Move 2015.2 (Midland Valley)

A. Contour map of the grey clay top surface. GPR profiles (yellow lines) and location of boreholes (white dots) are marked on the map.
B, C. 3D models of the grey clay top surface generated in Surfer 9.0 (Golden Software) and Move 2015.2 (Midland Valley)

nych wprowadzono wartości rzędnych dla tych głębokości (n.p.m.). Mapa stropu gliny szarej jest mapą różnicową uwzględniającą poziom terenu. Jako poziom odniesienia w przypadku danych otworowych przyjęto rzędne podawane w kartach otworów. Rzędna terenu dla otworów była określana geodezyjnie podczas ich wykonywania z dokładnością do 0,01 m. Rzędne pochodzące z numerycznego modelu terenu (NMT) LiDAR o rozdzielczości ok. 1×1 m nie mogły być użyte na tym etapie, ponieważ niektóre nieistniejące dziś otwory były wykonywane w latach 50. i 60. XX w. Rzędna terenu w tych latach znacząco odbiegała od dzisiejszej, m.in. ze względu na mniejszy stopień zabudowy mia-

sta. Rzędnych terenu pochodzących z NMT LiDAR użyto przy wprowadzaniu danych pochodzących z profilowań georadarowych. Z tak przygotowanych danych punktowych wykonano mapę izolinii (w interwale co 0,5 m) położenia stropu gliny szarej oraz trójwymiarowy model jej powierzchni. Do interpolacji danych wykorzystano metodę Radial Basis Function (RBF) dostępną w programie Surfer 9.0 (Golden Software). Pozwoliła ona na wyeliminowanie efektu zagęszczenia izolinii w miejscach o największym zagęszczeniu otworów. W celu przejrzystej wizualizacji modelu wykorzystano oprogramowanie Move 2015.2 (Midland Valley).

MAPY CIĘCIA POZIOMEGO

W celu zobrazowania rozkładu średnicy ziarna na obszarze badań, wykonano mapy cięcia poziomego w skali 1:25 000 i w interwale co 1 m dla rzędnych od 118 do 106 m n.p.m. Pozwoliło to na oszacowanie zmienności średnicy ziarna na określonej głębokości oraz na wyznaczenie rozkładu i zasięgu występowania utworów wodonośnych. Przekroje poziome dostarczyły również informacji dotyczących morfologii stropu gliny szarej (fig. 7).

W celu zobrazowania rozkładu średnicy ziarna na obszarze badań, wykonano 13 map cięcia poziomego (przekrojów poziomych) w skali 1:25 000. Do opracowania map wykorzystano metody interpolacji danych punktowych dostępne w programach Surfer 9.0 (Golden Software) oraz Move 2015.2 (Midland Valley). Mapy cięcia są przekrojami pozio-

mymi, które wykonano w interwale co 1 m dla rzędnych od 118 do 106 m n.p.m. Pozwoliło to na oszacowanie zmienności średnicy ziarna na określonej głębokości oraz na wyznaczenie rozkładu i zasięgu występowania utworów wodonośnych. Przekroje poziome dostarczyły również informacji dotyczących morfologii stropu gliny szarej – na każdym z przekrojów odcięto zasięg gliny szarej i powierzchni terenu na odpowiedniej głębokości (fig. 7).

Z kart otworów wiertniczych pozyskano dane dotyczące frakcji osadów występujących na poszczególnych głębokościach. Dla poszczególnych frakcji osadu przyjęto liczbowy parametr uziarnienia:

$$\varphi = -\log_2 * d \text{ [mm]}$$

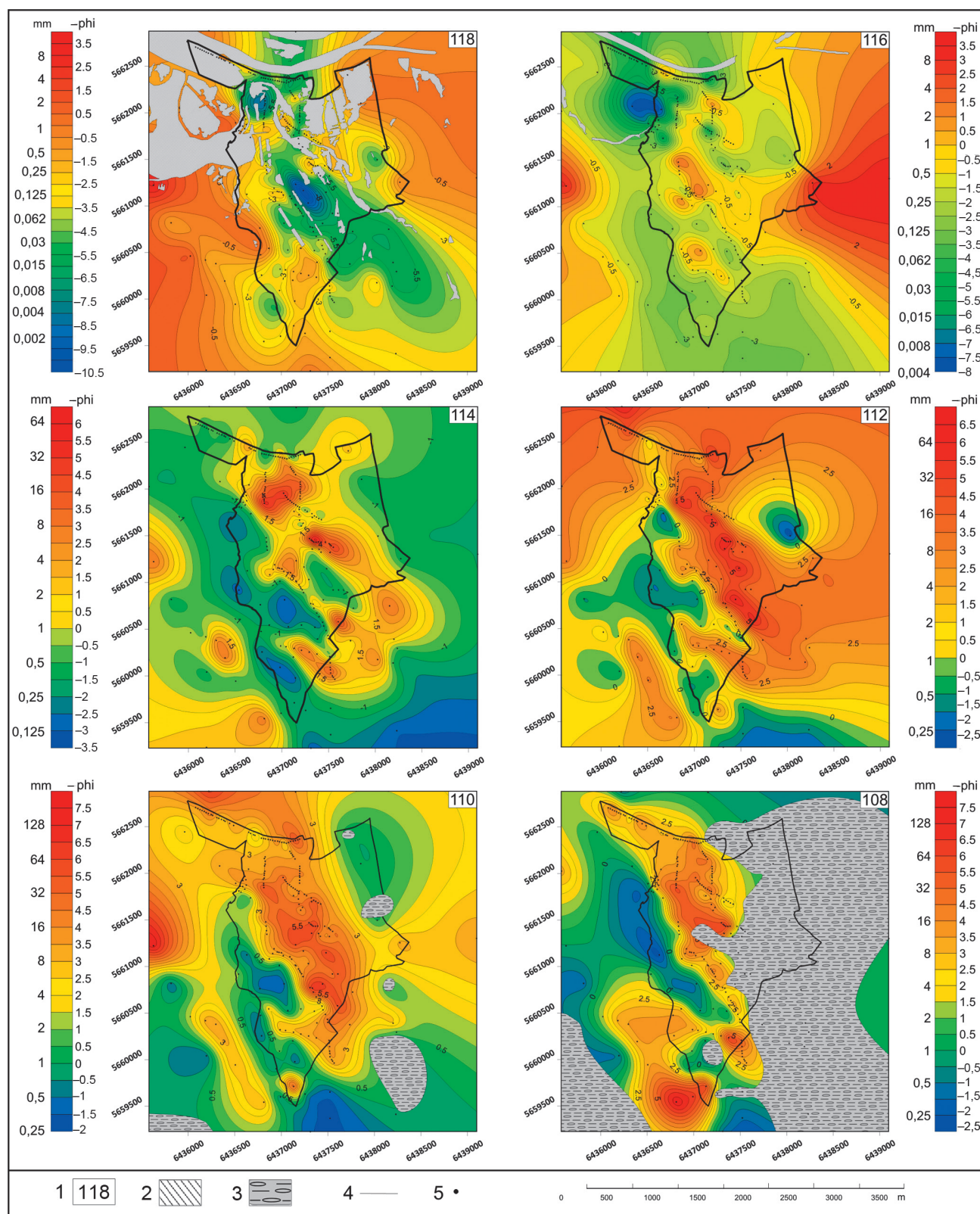


Fig. 7. Wybrane mapy warstwicowe cięcia poziomego wykonane dla rzędnych 118, 116, 114, 112, 110 i 108 m n.p.m.

Mapy przedstawiają rozkład średnicy ziarna (jednostki $-\phi$) na obszarze badań

1 – rzędna cięcia poziomego (m n.p.m.); 2 – obszary położone powyżej określonej rzędnej (na podstawie NMT LiDAR); 3 – glina szara; 4 – obszar badań; 5 – otwory wiertnicze

Selected contour maps of horizontal cuttings, generated for the elevations of 118, 116, 114, 112, 110 and 108 m a.s.l.

The maps show grain size distribution ($-\phi$ units) in the study area

1 – horizontal cutting elevation (m a.s.l.); 2 – areas located above the specified elevation (based on LiDAR DEM); 3 – grey clay; 4 – study area; 5 – boreholes

Parametr ϕ (fi), stosowany powszechnie w sedymentologii (np. Gradziński i in., 1986), umożliwia zastosowanie skali logarytmicznej dla średnicy ziarna (d) podanej w mm. Ujemny znak w definicji jednostki ϕ pozwala na stosowanie liczb dodatnich w stosunku do najmniejszych ziaren. Do opracowania map cięcia poziomego było jednak niezbędne zastosowanie ujemnego parametru ϕ :

$$-\phi = -\log_2 d \text{ [mm]}$$

Rozwiązanie to zostało wprowadzone przede wszystkim ze względów praktycznych, tak, aby najmniejszym ziarnom były przypisane wartości ujemne, a największym – dodatnie. Umożliwiło to wykonanie map izolinii w zakresie od -11 do $+7$ tego parametru, czyli od frakcji ilowej do frakcji żwiru gruboziarnistego (od 0,00049 do 128 mm średnicy ziarna). Jednostki metryczne nie mogły zostać zastosowane do interpolacji ze względu na dużą różnicę wartości bezwzględnych między średnicami najmniejszych i największych ziaren. Skutkiem zastosowania jednostek metrycznych byłoby więc nadmierne zagęszczenie izolinii na przekroju poziomym i konieczność generalizacji wielkości ziarna. W związku z brakiem precyzyjnej informacji, dotyczącej średnicy ziarna w kartach otworów wiertniczych (w kartach używano zazwyczaj informacji o klasie ziarna, np. piasek drobnoziarnisty), poszczególnym wydzieleniom litologicznym przypisano parametr liczbowy, odpowiadający środkowi przedziału klas wielkości ziaren skali Udden–Wentwortha (Wentworth, 1922). Dla każdego cięcia poziomego, wykonanego na określonej rzędnej, opracowano zestawienie tabelaryczne, obejmujące współrzędne metryczne (PUWG 2000/6) każdego otworu oraz parametr uziarnienia ($-\phi$). Uzyskana w ten sposób nieregularna chmura punktów stanowiła pod-

stawę do wykonania regularnej siatki interpolacyjnej o rozdzielczości 1×1 m. Do nierównomiernie rozmieszczonych punktów jest stosowana zazwyczaj interpolacja dwoma głównymi metodami: *krigingu* oraz *minimum curvature* (metoda minimalnej krzywizny) (Goldsztein, Skrzypek, 2004). Metody te nie dały jednak zadowalających rezultatów przy konstruowaniu map cięcia poziomego, głównie ze względu na linijne ułożenie otworów w niewielkich odległościach od siebie (bariery studni) oraz brak wystarczającej liczby danych na znacznych obszarach opracowania poza barierami studni. Przy konstruowaniu cięć poziomych wykonano interpolację metodą Radial Basis Function (RBF), dostępną w oprogramowaniu Surfer 9.0 (Golden Software), która jest uważana za jedną z najskuteczniejszych metod interpolacji dla punktów rozmieszczonych w tak nieregularny sposób (Surfer, User's Guide, 2002). Metoda umożliwia optymalne wyznaczenie współczynnika „wygładzenia izolinii” (ang. *smoothing factor* – R2), niwelującego rozbieżności odległości między punktami. W związku z bardzo niewielką, najczęściej południkową, odległością między węzłami nieregularnej siatki (bariery studni) i bardzo dużą odległością między punktami na linii wschód–zachód na obszarze badań, było również konieczne wprowadzenie tzw. współczynnika anizotropii (ang. *anisotropy ratio*) i jej kąta (ang. *anisotropy angle*), odpowiedniego dla rozkładu punktów (azymut ok. 315°). Tak skonstruowana siatka punktów posłużyła do wykonania znormalizowanych map izolinii rozkładu średnicy ziarna. Dla poszczególnych zakresów wartości użyto skali barwnej, a dla lepszej korelacji jednostkę $-\phi$ przedstawiono na skali również w odpowiadających jej wartościach metrycznych (mm). Na każdej mapie cięcia umieszczono również otwory, które posłużyły do interpolacji danych oraz obrys obszaru opracowania.

MAPA MIĄŻSZOŚCI POZIOMU WODONOŚNEGO

Wykonano model 3D stropu głównego poziomu wodonośnego (1) oraz mapę jego miąższości (2). Są to mapy różnicowe, które powstały odpowiednio przez odjęcie od punktów wyznaczających powierzchnię terenu punktów wyznaczających strop warstwy wodonośnej (rzędne) (1) oraz przez odjęcie od punktów tworzących powierzchnię

stropu poziomu wodonośnego punktów użytych do interpolacji stropu glin szarych (2). Mapy wykonano w rozdzielczości 1×1 m. Do opracowania map wykorzystano metody interpolacji danych punktowych, dostępne w programie Surfer 9.0 (Golden Software) oraz Move 2015.2 (Midland Valley) (fig. 8).

ARCHITEKTURA LITOFACJALNA OBSZARU

Poza wykonaniem modelu wcześniej wspomnianych powierzchni, czyli powierzchni charakteryzujących główne elementy zewnętrznej architektury formacji osadowych, podjęto również próbę oceny budowy wewnętrznej badanych osadów. Analiza facjalna pozwala na postawienie hipotez zarówno sedymentologicznych, jak i paleogeograficznych (paleohydrograficznych). Dalej przedstawiono również próbę oceny wpływu najważniejszych właściwości jedno-

stek geologicznych na procesy filtracji i oceny bilansowej filtracji (infiltracji). Do wydzieleni o cechach jednostek litostratygraficznych można zaliczyć: powierzchniowe utwory nieprzepuszczalne (o niskiej przepuszczalności), śródformacyjne utwory nieprzepuszczalne (o niskiej przepuszczalności), utwory nieprzepuszczalne (o niskiej przepuszczalności) w podłożu pierwszej warstwy wodonośnej (gлина szara), żwiry rezydulanne (głazowiska) w stropie gliny szarej oraz

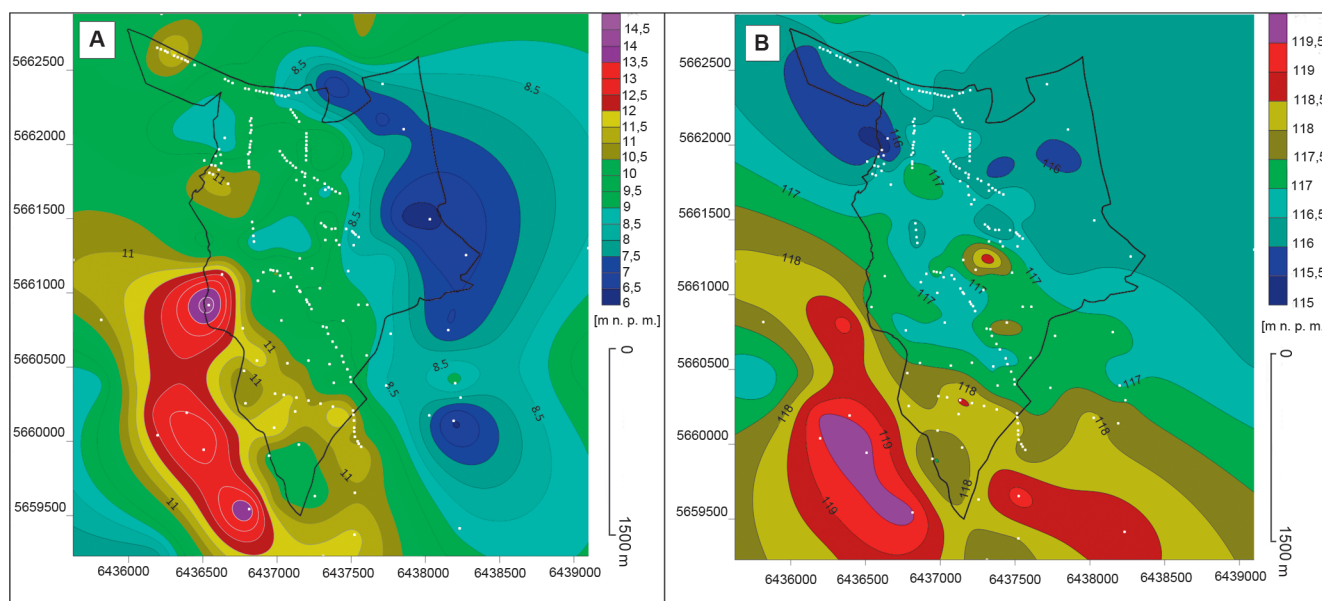


Fig. 8. A. Mapa miąższości wodonośnych utworów przepuszczalnych na obszarze badań. B. Mapa poziomicowa rzędnej położenia stropu wodonośnych utworów przepuszczalnych

A. Thickness map of the first (Quaternary) aquifer above the grey clay top surface in the study area. **B.** Contour map of the top of the first (Quaternary) aquifer in the study area

piaszczysto-żwirowe osady rzeczne. Wymienione wyżej jednostki litofacjalne zostaną omówione kolejno w układzie stratygraficznym, czyli od najstarszych do najmłodszych (od dołu ku górze).

GLINA SZARA

Glina szara występuje na terenie całego Wrocławia zarówno w obrębie tzw. Pradoliny Odry, jak i poza nią. Glina tworzy pokład o przeciętnej grubości od 15 do 25 m, lokalnie ponad 40 m. Strop warstwy na terenie Wrocławia leży przeciętnie na głębokości od 2 do 25 m i jedynie lokalnie, w obrębie Doliny Odry, znacznie niżej, bo aż na głębokości ok. 100 m. Na obszarze wodonośnym strop gliny występuje na głębokości od 6,4 do 15,7 m.

Glina jest silnie zapiaszczona. W tle skalnym gliny są widoczne rozproszone konkracje wapienne. Ich przeciętna wielkość wynosi ok. 3 mm. Największe skupiska węgla wapnia, mają ameboidalny kształt i dochodzą do 15 cm średnicy. Przeciętna zawartość węgla wapnia w glinie wynosi od 8 do 12%, chociaż miejscami jest znacznie wyższa. Wapnistość gliny sprawiła, że osad ten był często nazywany „gliną marglistą” (niem. *grauer Geschiebemergel/-lehm*). Glina po wyschnięciu staje się bardzo twarda i uderzona rozłupuje się na wiele fragmentów o nierównych, chropowatych lub muszlowych powierzchniach przełamu.

Strop gliny szarej tworzy wielkopromienne elewacje, o amplitudach od 0,3 do 1,0 m i odstępach od 50 do 150 m. Z danych pochodzących z innych stanowisk we Wrocławiu należy spodziewać się, że glina szara jest spękana, a spękania tworzą regularny (ukierunkowany) i równomiernie rozmieszczony system. Dominujące kierunki spękań to 250–70°

oraz 160–350°. Jest to najprawdopodobniej tzw. cios, który powstał w przemarzniętym osadzie (tzw. zmarzliny) wskutek dużego nacisku lub wskutek jej reakcji na ruchy tektoniczne w podłożu.

Glina szara jest utworem półprzepuszczalnym. Powierzchnia stropu gliny szarej tworzy wyraźną elewację w części wschodniej obszaru i zdecydowanie obniża się ku zachodowi. Obniżenie ma charakter kopalnego progu morfologicznego (skarpy, zbocza). Nierówna krawędź jest rozcięta poprzecznymi, zorientowanymi równoleżnikowo osiowymi obniżeniami o szerokości do ponad 300 m. W zachodniej części obszaru wodonośnego strop gliny szarej tworzy południkową pogrzebaną strukturę dolinną o szerokości blisko 2 km.

Przyjmuje się, że glina szara powstała w okresie tzw. południowopolskiego zlodowacenia Sanu, kiedy lądolód skandynawski miał największy, południowy zasięg na obszarze Dolnego Śląska. Czas trwania tego zlodowacenia ocenia się na od ok. 730 do ok. 430 tys. lat.

ŻWIRY REZYDUALNE, BLOKOWISKA

W górnej części pokładu gliny szarej występują liczne bloki skalne, głównie fragmenty różnych skał krystalicznych pochodzenia skandynawskiego (tzw. eratyki). Największe z nich, o czym wiemy z odsłonień w innych częściach Wrocławia, mogą osiągać rozmiary ponad 2 m (!). Wśród bloków występują również sylurskie i kredowe skały wapienne, pochodzące z terenów dzisiejszej Estonii, zawierające liczne skamieniałości zwierząt, w tym m.in. szczątki ramienionogów, głowonogów i koralów. Bloki występują licznie na powierzchni gliny, gdzie lokalnie tworzą duże i zwarte nagro-

madzenia o charakterze bruków rezydualnych, tzn. nagromadzenia materiału wymytego ze starszych osadów (np. niżej w profilu występującej w profilu gliny szarej).

ŻWIRY RZECZNE

Najstarsze osady żwirowe występujące ponad gliną szarą w zachodniej części obszaru wodonośnego rozpoznano tutaj wyłącznie w wierceniach. Analogiczne do nich, utwory żwirowe znane są ze stanowisk oddalonych ok. 1–4 km od obszaru badań (południowa część Parku Szczytnickiego, kanał przeciwpowodziowy w Bartoszowicach i na Kowalach). Można zatem z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że przykrywające glinę szarą żwiry mają barwę żółtą lub szarżółtą. Są to dobrze lub bardzo dobrze wysortowane piaski gruboziarniste i żwiry. Osady są warstwowane przekątnie, wykazując niemal wszystkie typy warstwowań. Lokalnie występują wysokokątowe zestawy warstw czołowych (osady migrujących nasypów śródkorytowych). Powierzchnie spągowe zestawów są rynnami o osiach zorientowanych SSE–NNW, czyli zgodnie z osią kopalnej struktury dolinnej w stropie gliny szarej. W spągach wielozestawów masowo występują znakomicie zachowane i silnie uwęglone pnie drzew, tzw. „czarne dęby”. Ich występowanie na terenie Wrocławia, a szerzej na obszarze Dolnego Śląska, jest znane od dawna (niem. *Eichenstämmle*) (Tietze, 1914). Czarne dęby, poza tym, że stanowią poszukiwany materiał do wyrobów meblarskich, mają ogromne znaczenie w datowaniu osadów, w których występują. Wiek czarnych dębów w osadach pokrywających szarą glinę na terenie Wrocławia wynosi od ok. 6000 do ok. 500 lat. Oznacza to, że osady, w których występują, są holocenijskie i powstawały w czasie od tzw. okresu atlantyckiego po współczesność.

Zarówno kopalna dolina, jak i żwiry są zapewne osadami pre-Odry, która w początkowym okresie, tuż po wycofaniu się lądolodu, miała charakter dużej rzeki roztokowej, przypominającej współczesne rzeki północnych obszarów Syberii, czy Kanady. Warto wspomnieć, że właśnie w tym poziomie osadów, na obszarze tzw. międzyrzecza Widawa–Odra, znajdowano szczątki mamutów i artefakty z epoki neolitu (Geschwendt, 1934). Mapy cięcia poziomego pokazują wyraźnie wielokorytowy charakter rzeki (por. fig. 7).

Na obszarze badań wymienione najstarsze utwory kopalnej doliny pre-Odry mają najlepsze właściwości filtracyjne. Należy się wręcz spodziewać, że mogą one spełniać rolę lokalnej strefy drenażu wód podziemnych 1. poziomu wodonośnego, i że właśnie tam jest zlokalizowany zasadniczy strumień przepływu (filtracji) wód podziemnych. Głównie z tego powodu, ale również z uwagi na najniższej położony właśnie w części zachodniej obszaru wodonośnego strop warstwy słabo przepuszczalnej (gliny szarej), dolne żwiry stanowią potencjalnie najbardziej perspektywiczną strefę ujmowania wody podziemnej. Ich zewnętrzna architektura (stanowią wypełnienie formy dolinnej) wymusza ukierunkowany przepływ wody podziemnej (filtrację), ale również należy się spodziewać znaczącej anizotropii teksturalnej ośrodką, która również uprzywilejowuje południkowy kierunek

filtracji (por. Wojewoda, 1982). Poziom żwirów bezpośrednio kontaktuje z korytowymi osadami leżących wyżej rzecznych osadów piaszczysto-żwirowych.

PIASKI, ŻWIRY I MADY SYSTEMÓW MEANDROWYCH PRE-ODRY I OŁAWY

Utworami, które występują niemal na całym obszarze wodonośnym, objętym opracowaniem, są w przewodzie piaszczysto-żwirowe utwory rzeczne. Tworzą one dwa systemy architektoniczne rzeki meandrującej (tzw. pasy meandrowe) – większy i dominujący na całym obszarze wodonośnym system pasa meandrowego pre-Odry, o w przybliżeniu równoleżnikowej osi, oraz mniejszy, występujący w środkowej i południowo-wschodniej części obszaru wodonośnego, o osi w przybliżeniu NW–SE (fig. 9). Obydwa pasy mają podobną architekturę, różnią się jedynie rozmiarami odsypów meandrowych i promieniami zakoli meandrowych. Najprawdopodobniej, pas meandrowy Oławy powstał w wyniku przebudowy osadów pasa meandrowego pre-Odry, zatem w stosunku do poprzedniego zajmuje najwyższą (najmłodszą) pozycję w systemie litostratygraficznym obszaru wodonośnego. Rozwój pasa meandrowego wiąże się z przepływem rzeki meandrującej w granicach wyznaczonych promieniem zakoli meandrowych. Ten zależy od wielkości rzeki (koryta rzeki) i nachylenia powierzchni terenu, po którym płynie rzeka.

W każdej sytuacji architektura osadów rzeki meandrującej nosi cechy typowe dla tzw. cyklotemu meandrowego, którego rozwój wynika z synchronicznie zachodzących: erozji brzozi wklęsłego, transportu osadu w korycie rzeki (rumosz denny, bruk korytowy) i depozycji materiału osadowego na zboczach odsypu meandrowego (brzeg wypukły) (fig. 10A). Typowy cyklotem meandrowy obejmuje (od dołu): gruboziarniste osady bruku korytowego (żwiry), warstwowane osady odsypu meandrowego (naprzemianległe zestawy piasku i żwiru) oraz drobnoziarniste utwory doliny zalewowej – mady (bezstrukturalne muły) (fig. 10A, B).

Miękkość cyklotemu meandrowego zależy wprost od wielkości rzeki, zwłaszcza od głębokości koryta i wysokości zalewu wezbraniowego (powodziowego). Głębokość koryta rzeki meandrowej wyznacza przeciętny poziom wody gruntowej w pierwszym poziomie wodonośnym (baza erozyjna), natomiast wysokość meandru wyznacza poziom do jakiego może odbywać się sedymentacja na jego powierzchni w warunkach zatopienia powodziowego. I tak meandry pasa pre-Odry mają promień do nieco ponad 650 m (na obszarze wodonośnym do 580 m), podczas gdy meandry pasa Oławy – do nieco ponad 225 m. Wysokość odsypów meandrowych współczesnej Odry ponad dno koryta (starorzecza) sięga 3–4 m, co oznacza, że w przybliżeniu właśnie taka jest przeciętna grubość cyklotemów meandrowych na obszarze pasa meandrowego (pre-)Odry. Tym samym, w północno-wschodniej części badanego obszaru wodonośnego, należy się spodziewać występowania od 2 do 3 zalegających na sobie cyklotemów meandrowych. Oznacza to również możliwość pojawienia się na tym obszarze od 1 do 2 wkładek słaboprzepuszczalnych i nieciąglych poziomów mad rzecznych.

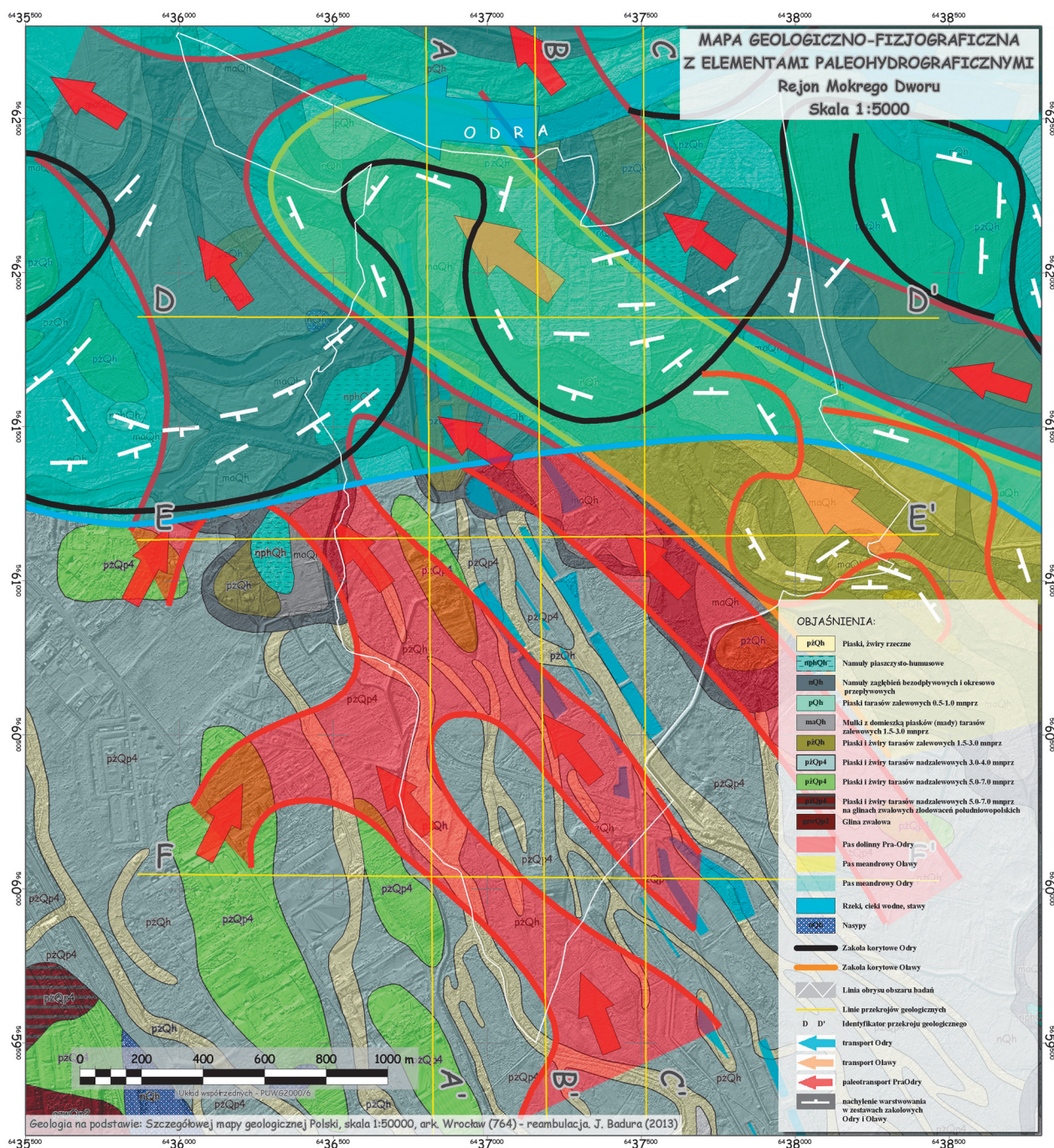


Fig. 9. Mapa geologiczno-fizjograficzna obszaru wodonośnego z zaznaczonymi elementami paleogeograficznymi – pasami meandrowymi pre-Odry i pre-Oławy

Geological-physiographic map of the aquifer area with paleogeographical features marked – meander belt systems of the pre-Odra and pre-Oława rivers

Ich szacunkowa miąższość nie powinna przekraczać na całym obszarze opracowania 0,6 m grubości.

Jak widać z załączonego schematu faćjalnego, zdecydowana większość objętości osadów to osady odsypowe, które wykazują charakterystyczne, niskokątowe (0–10°) warstwowanie przekątne w wielkiej skali. Naprzemianległe warstwy (zestawy) piasku i żwiru są nachylone zgodnie z geometrią

zakola korytowego i kierunkiem przyrastania odsypu meandrowego (fig. 10). Sprawia to, że pierwotna (sedymentacyjna) struktura osadu ma lokalnie zmienne właściwości filtracyjne, a w skali całej struktury wodonośnej wykazuje wyraźną anizotropię strukturalną, która musi przejawiać się w anizotropii hydraulicznej ośrodka. W naturalnych warunkach znacznie bardziej wydajna (uprzywilejowana) jest infil-

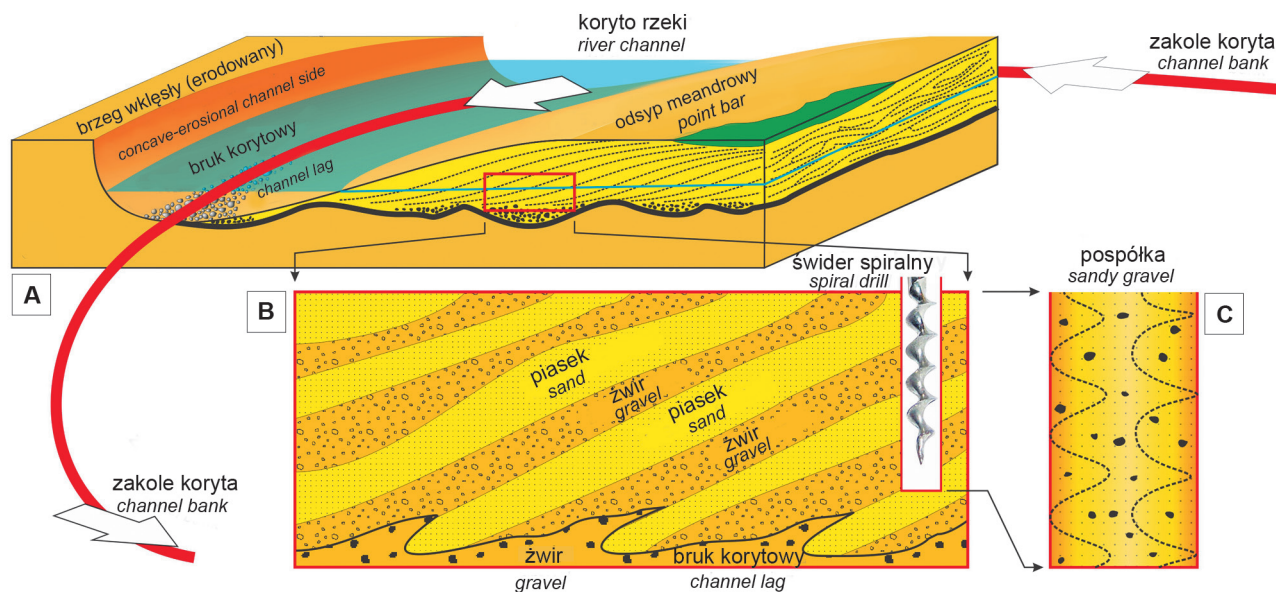


Fig. 10. Schemat pokazujący proces powstawania i architekturę wewnętrzną osadów cyklotemu meandrowego oraz mechanizm niszczenia pierwotnej struktury osadu w trakcie wiercenia

Scheme for the point bar formation, its internal sedimentary architecture, and a mechanism of original internal structure destruction resulting from drilling

tracja powierzchniowa zgodnie z kierunkiem nachylenia warstwowania, co dodatkowo wzmacnia drenaż w strefie koryta rzecznoego lub starorzecza. Tym samym, uzasadnione jest lokalizowanie ujęć wody na obrzeżach kopalnych i współczesnych odsypów meandrowych, a nie w ich centrum.

Dodatkową komplikacją w ustaleniu parametrów modelu hydrogeologicznego może stwarzać tradycyjny sposób przyjęcia dokumentacji geologicznej warstwy wodonośnej na podstawie materiałów uzyskanych z wierzeń przy zastosowaniu świdrów. To, co w naturalnym i niezaburzonym układzie warstw może stanowić istotną przesłankę dla lokalizacji ujęć wody podziemnej i optymalizacji przestrzennej procesu infiltracji, czyli wiedza o anizotropii hydraulicznej układu, ulega całkowitemu zatarciui uśrednionemu opisowi. To właśnie sprawiło, że dla osadów określanych tradycyjną nazwą „pospółka” przyjęto gorsze, z punktu widzenia ich właściwości hydraulicznych, parametry uziarnienia, podczas gdy

mogą się one okazać znacznie korzystniejsze w przypadku ukierunkowanego wymuszonego kierunku filtracji, zgodnego z anizotropią strukturalną osadu. Należy przyjąć, że przepuszczalność w gruncie niezaburzonym będzie bliższa żwirom niż piaskom, podczas gdy dla pospółki (mieszaniny piasku i żwiru) konieczne jest przyjęcie przepuszczalności najdrobniejszego składnika, jakim jest piasek (fig. 10C).

Osady pasów meandrowych pre-Odry i Oławy na obszarach wodonośnych objętych opracowaniem tworzą pokrywę, do której w praktyce odbywa się wymuszona i naturalna infiltracja powierzchniowa na obszarze wodonośnym. Jednocześnie, w częściach północno-zachodniej i zachodniej kontaktują się one bezpośrednio ze żwirami dolnymi, występującymi niżej w profilu. Tym samym, żwiry dolne są bezpośrednio zasilane z leżących wyżej osadów rzecznych. Stwarza to bardzo dogodny układ do odzyskiwania wody podziemnej, co już dawno zauważyli geolodzy niemieccy, projektując zręby dzisiejszego ujęcia wody dla Wrocławia.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wieloaspektowe geologiczne i geofizyczne prace badawcze, przeprowadzone na obszarze terenów wodonośnych ujęcia infiltracyjnego MPWiK we Wrocławiu, pozwoliły na rozpoznanie architektury osadów wodonośnych i wykonanie trójwymiarowego modelu warstwy wodonośnej o wysokiej rozdzielczości. Do konstrukcji modelu budowy geologicznej wykorzystano dane pochodzące z 215 otworów wiertniczych, geologiczne opracowania archiwalne, a także 30 pro-

fili georadarowych. Prace kartograficzne, uzupełnione o analizę facjalną utworów tworzących warstwę wodonośną, pozwalają na sformułowanie kilku ważnych wniosków.

1. W podłożu utworów przepuszczalnych, tworzących pierwszą i zarazem najistotniejszą z gospodarczego punktu widzenia warstwę wodonośną w południowo-wschodniej części aglomeracji wrocławskiej, występują utwory nieprzepuszczalne, tzw. „gliny szare”.

2. Strop glin szarych tworzy formę przestrzenną o cechach paleoreliefu o wyraźnie zaznaczającej się strukturze paleodoliny, o szerokości od 300 do 700 m i o osi o azymucie ok. 150–330°.
3. Żwirry wypełniające strukturę dolinną, stanowiące przypuszczalnie kopalne osady korytowe tej paleodoliny, są głównym zbiornikiem wody podziemnej i mają zarazem najlepsze parametry filtracyjne. Można spodziewać się w ich obrębie wyraźnej anizotropii współczynnika filtracji o maksimum w kierunku zgodnym z przypuszczalnym paleoprzepływem w dolinie, tzn. ku NW.
4. Występujące powyżej żwirów piaski i piaski ze żwirem („pospółki”) stanowią osady cyklotemów meandrowych, tworzących dwa pasy dolinno-meandrowe – paleo-Odry i paleo-Oławy. Parametry filtracyjne tych osadów są również bardzo dobre, jednak utwory te przypuszczalnie wykazują dużą zmienność strukturalną i tym samym znaczną lokalną anizotropię współczynnika filtracji, zależną od lokalnej architektury cyklotemów meandrowych.
5. Nieprzepuszczalne osady powierzchniowe, którym lokalnie towarzyszy zjawisko napinania zwierciadła wody gruntowej, mają charakter bardzo lokalny. Są to poziomy mad zalewowych, o niewielkim zasięgu lateralnym i bardzo zmiennych cechach hydrogeologicznych.
Powyższe wnioski stanowią czysto aplikacyjną stronę opracowania. Obecnie trwają przygotowania do analizy porównawczej osadów pierwszego poziomu wodonośnego na większym obszarze, niż tego wymagało niniejsze opracowanie, głównie pod kątem rekonstrukcji paleogeograficznych obszaru aglomeracji wrocławskiej.

Podziękowania. Autorzy pragną podziękować za umożliwienie przeprowadzenia badań i ich publikację Pracownikom i Kierownictwu MPWiK we Wrocławiu. Dziękujemy również Kolegom z Zakładu Hydrogeologii Podstawowej ING Uniwersytetu Wrocławskiego, którzy pod kierunkiem prof. dr. hab. Stanisława Staśki wzorowo współpracowali z nami przy dokumentacji obszaru ujęć.

LITERATURA

- BADURA J., CISZEK D., 2013 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Wrocław (764). Reambulacja, 1014396 Inw. 1312/2014. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- BOWLING J.C., RODRIGUEZ A.B., HARRY D.L., ZHENG C., 2005 — Delineating alluvial aquifer heterogeneity using resistivity and GPR data. *Ground Water*, **43**, 6: 890–903.
- CBDH — Centralny Bank Danych Hydrogeologicznych HYDRO. PIG-PIB, Warszawa.
- COBRA PLUG-IN GPR USER MANUAL, 2014 — Radar Team Sweden AB, Boden, Sweden.
- DANIELS D., 2004 — Ground Penetrating Radar (2nd ed.). The Institution of Electrical Engineers, London.
- DOETSCH J., LINDE N., PESSOGNELLI M., GREEN A.G., GÜNTER T., 2012 — Constraining 3-D electrical resistance tomography with GPR reflection data for improved aquifer characterization. *Journal of Applied Geophysics*, **78**: 68–76.
- DOOLITTLE J.A., JENKINSON B., HOPKINS B., ULMER M., TUTTLE W., 2006 — Hydropedological investigations with ground-penetrating radar (GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *Geoderma*, **131**: 317–329.
- ENDRES A.L., CLEMENT W.P., RUDOLPH D.L., 2000 — Ground penetrating radar imaging of aquifer during a pumping test. *Ground Water*, **38**, 4: 566–576.
- GAŃKO M., MIESZKOWSKI R., GAŃKO A., 2015 — Zastosowanie metody georadarowej do określania położenia swobodnego zwierciadła wód podziemnych w trakcie próbnego pomiaru. *Prz. Geol.*, **63**, 10, 1: 721–726.
- GESCHWENDT F., 1934 — Siedlungsgeschichtliche Beobachtungen im Oder-Weidetal bei Gross-Breslau. *Altschlesien*, **4**, Breslau.
- GOLDSZTEJN J. (red.), 2009 — Baza danych geologiczno-inżynierskich wraz z opracowaniem Atlasu geologiczno-inżynierskiego aglomeracji wrocławskiej. Wrocław.
- GOLDSZTEJN P., SKRZYPEK G., 2004 — Wykorzystanie metod interpolacji do numerycznego kreślenia map powierzchni geologicznych na podstawie nieregularnie rozmieszczonych danych. *Prz. Geol.*, **52**, 3: 233–236.
- GRADZIŃSKI R., KOSTECKA A., RADOMSKI A., UNRUG R., 1986 — Zarys sedimentologii. Wydaw. Geol., Warszawa.
- IGEL J., GÜNTER T., KUNTZER M., 2013 — Ground-penetrating radar insight into a coastal aquifer: the freshwater lens of Borkum Island. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **17**: 519–531.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M., 2011 — Zarys metody georadarowej. Wyd. 2. Wydaw. AGH, Kraków.
- KARTE des Deutschen Reiches, 424 Breslau, 1: 100 000. Abteilung der Königl. Preuß. Landesaufnahme, 1889. Auflagedruck, 1912.
- LECKEBUSCH J., 2007 — Pull-up/pull-down corrections for ground-penetrating radar data. *Archaeological Prospection*, **14**: 142–145.
- MANU E., PREKO K., WEMEGAH D.D., 2014 — Estimation of water table depths and local groundwater flow pattern using the Ground Penetrating Radar. *Int. J. Sci. Res. Pub.*, **4**, 8: 1–12.
- MAPA TOPOGRAFICZNA 1: 10 000 Wrocław, arkusze: M-33-35-C-a-4, M-33-35-C-b-3, M-33-35-C-c-2, M-33-35-C-d-1, PUWG92/19. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa 1998.
- NEAL A., 2004 — Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, **66**: 261–330.
- NMT (Numeryczny Model Terenu), format ASCII XYZ, układ współrzędnych PUWG92/19; zbiór pokrywający arkusze mapy: M-33-35-C-a-4-3, M-33-35-C-a-4-4, M-33-35-C-b-3-3, M-33-35-C-c-2-1, M-33-35-C-c-2-2, M-33-35-C-d-1-1 w skali 1:5000. CODGiK Warszawa, 2015.
- ORTOFOTOMAPA WROCLAW, 2015 — System Informacji Przestrzennej Wrocławia – www.geoportal.wroclaw.pl.
- SURFER®. User's Guide, 2002 — Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. Golden Software Inc., Colorado.
- TIETZE O., 1914 — Neue geologische Beobachtungen aus der Breslauer Gegend (Zur Geologie des Oderstromtales bei Breslau und Maltsch.). *Jb. Preus. Geol. Landesanst.*, **35**, 1: 311–315.

- TOPOGRAPHISCHE KARTE 1:25000, 4968 Breslau Süd. Preuß. Landesaufnahme, 1886. Ausgabe 1942.
- WCISŁO M., BUCZYŃSKI S., STAŚKO S., OLICHWER T., TARKA R., 2016 — Hydrogeologiczne uwarunkowania intensyfikacji poboru wód infiltracyjnych na potrzeby miasta Wrocławia. *W: 3. Polski Kongres Geologiczny – Wyzwania Polskiej Geologii* (red. J. Wojewoda), Wrocław 18–22.09.2016. Tom streszczeń: 419–423.
- WENTWORTH C.K., 1922 — A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, **30**, 5: 377–392.
- WOJEWODA J., 1982 — Teksturalna anizotropia filtracji w niezdiagnozowanym osadzie piaszczystym. *Prz. Geol.*, **353**: 485–487.
- ŽUK T., SMITH G.H.S., 2015 — Stratygrafia radarowa – metoda analizy danych georadarowych 3D w badaniu środowisk sedymentacyjnych na przykładzie osadów rzecznych. *Prz. Geogr.*, **87**, 3: 439–456.

SUMMARY

The paper presents a 3D model of the geological structure of the infiltration intake area in the Wrocław aquifers, based on which a hydrogeological model was constructed. The research was aimed at optimizing the aquifer recharge from the surface. The study area is located in the eastern part of Wrocław and covers an area of 3.422 km² in the shape of an irregular triangle (Figs 1–3). Archival borehole data were used in the analyses performed in 215 boreholes that were finally selected from a large number of analysed well logs. They were drilled at least to the top surface of the so-called grey boulder clay (or till) which is the basic impermeable horizon beneath the aquifer.

The geological structure of the water intakes area is relatively simple. The pre-Cenozoic basement located at a depth of ca. 45 m b.g.l. is composed of Triassic sediments, represented by Muschelkalk limestones, and Keuper heterolithic series of detrital rocks with dolomite interbeds. The top surface of the Tertiary, documented in a few boreholes, occurs 65–69 m above sea level. Locally, in the western part of the area (at Brochów), this surface occurs at a much higher elevation of 90–100 m a.s.l. The area is covered by sands, gravels, fluvial muds, and Holocene peats and silts, as the youngest members filling the Odra River valley in the area (Goldsztejn, 2009).

Geophysical surveys were conducted with the use of the Swedish Radarteam Sweden AB Cobra Plug-In GPR georadar equipped with a Mesa Rugged Notepad™ steering unit. The soundings were conducted using the Sub-Echo 40 non-screened antenna with a central frequency of 52 MHz. Georadar soundings were made in localities recognised earlier by shallow boreholes. Interpretation of 15 selected echograms was made. Correlation of the images from echograms with well logs allowed indicating the top surface of the grey clay being the first important impermeable (semipermeable?) horizon in the study area. The best results were obtained for logs GPR01, 09, 12 and 17 (Figs 4, 5).

The main aim of the 3D modelling was to obtain data on the relief and position of the top surface of the impermeable layer and on the grain-size variability of aquifer sediments. The 3D model of the top surface of the grey clay (basal surface of the aquifer), including the contour map of its isolines (every 0.5 m), was constructed based on borehole data and georadar profiles. Data were interpolated using the interpolation methods available in Surfer 9.0 (Golden Software) (Figs 6, 7).

Images of the grain-size distribution in the study area were shown as horizontal section maps at the scale of 1:25,000 and interval of 1 m for levels between 118 and 106 m a.s.l. This allowed for evaluating the variability of grain size at a given depth and recognising the distribution and range of the aquifer sediments.

A 3D model of the top surface of the main aquifer (1) and an aquifer thickness map (2) were also prepared (Fig. 8).

The most important lithostratigraphic units of the aquifer area include:

- Grey till, represented by a semipermeable layer ranging in thickness from 15 to 25 m (locally over 40 m). In the aquifer area, the top surface of the clay occurs at a depth from 6.4 to 15.7 m below surface level. The top surface of the grey till forms extensive (ca. 50–150 m) and flat (ca. 0.3–1.0 m) elevations in the eastern part of the area and distinctly decreases towards the west. The depression probably represents a fossil morphological step (escarpment, slope). The uneven margin is cut by transverse, latitudinally oriented axial depressions with a width up to 300 m. In the western part of the aquifer area, the top surface of the grey till forms a longitudinal buried valley, up to almost 2 km in width. Numerous rock blocks, mainly fragments of different Scandinavian erratic boulders, occur in the upper part of the till horizon and on its surface.
- Lower gravels overlying the clays. Locally, the blocks form large and compact accumulations of residual blocks. The ancient valley and the lower gravels are related to the pre-Odra River that was a large braided river in the initial phase, after the retreat of the ice sheet. In the study area, these sediments have the best infiltration properties. It should be expected that they may play the role of a local zone of groundwater drainage from the first aquifer horizon, and the main stream of groundwater physical flow (filtration) is located within them. The lower gravels are potentially the most prospective zone of the groundwater intake. Their external architecture (as a fill of a valley structure) constrains directional groundwater flow (filtration), but a significant textural anisotropy of the medium, which would also favour the longitudinal orientation of filtration (see Wojewoda, 1982), should also be expected.
- upper sands and gravels which are located directly on the lower gravels. These sediments form two meander belts

– a larger pre-Odra River belt dominating in the entire area, with a sub-latitudinal axis, and a smaller Oława River belt occurring in the central and south-eastern part of the aquifer area, with an approximately NW–SE axis (Fig. 9).

The sediments of winding and meandering rivers have features typical of a meandering cyclothem, which is formed due to simultaneous sediment erosion, transportation and deposition on a meander point bar (Fig. 10A). From the base, the cyclothem is composed of coarse-grained channel lag, bedded sand-gravel point-bar sediments, and fine-grained and structureless floodplain overbank muds (Fig. 10A, B).

The thickness of the meander cyclothem depends on the depth of the channel and the high-water level. The depth of the meandering river channel is marked by the groundwater level (erosional base), whereas the point bar height indicates the sedimentation level during floods. In the aquifer area the radiuses of the pre-Odra belt meanders are up to 580 m, whereas those of the Oława belt meanders are up to about 225 m. The height of the point bars in the present-day Odra River is 3 to 4 m above the channel bottom, which means that this is the average thickness of the meander cyclothem in the pre-Odra meander belt. Therefore, 2–3 stacked meander cyclothem are expected in the north-eastern part of the study area. This also suggests that 1–2 poorly permeable horizons and discontinuous levels of overbank muds are ex-

pected. Their estimated thickness should not exceed 0.6 m in the entire study area.

Most sediments in the intake area are point-bar deposits, which reveal characteristic, low-angle ($0\text{--}10^\circ$), large-scale cross-bedding. The interbedding sets of sands and gravel are inclined according to the geometry of the channel bend and the direction of point-bar accumulation (Figs 9, 10). This causes that these sediments locally have variable filtration properties, and they reveal anisotropy on the scale of the entire aquifer structure, which in turn influences the hydraulic anisotropy of the medium. The infiltration is much greater according to the direction of bedding inclination, which additionally increases the drainage rate in the zones of the fluvial channel or oxbow lake. Therefore, locating the water intakes in the margins of ancient and present-day meander point-bars, and not in their central parts, seems justified.

Sediments of the pre-Odra River and Oława River meander belts of the analysed aquifer areas form a cover, in which imposed and natural surface infiltration takes place in practice in the aquifer area. In the north-western and western part of the area, these sediments contact directly with the lower gravels, occurring lower in the section. Therefore, the lower gravels are naturally directly infiltrated from the overlying fluvial sediments. This creates a very favourable system for groundwater recovering, as already discovered long ago by German geologists, who designed the outlines of the present-day water intake for Wrocław.

