

## Zastosowanie metody georadarowej do identyfikacji stref erozji dna rzeczno- na przykładzie wybranego odcinka doliny Wisły w Warszawie

Radosław Mieszkowski<sup>1</sup>, Emilia Wójcik<sup>1</sup>, Dorota Żmudzin<sup>1</sup>,  
Anna Szwarz<sup>2</sup>, Anna Sosnowska<sup>3</sup>, Paweł Popielski<sup>3</sup>



R. Mieszkowski



E. Wójcik



D. Żmudzin



A. Szwarz



A. Sosnowska



P. Popielski

**Application of GPR method for identifying riverbed erosion zones on the example of selected section of the Vistula valley in Warsaw.** *Prz. Geol.*, 65: 785–789.

*Abstract.* In the article the occurrence of several natural thresholds in Vistula River valley was discussed. These forms are stabilizing river channel regime and impeding shipping at the same time. The example of application of ground penetrating radar (GPR) for detecting and identifying the erosion zones in the bottom of the river valley was presented. The investigations were carried out along the chosen section of Vistula River in the vicinity of Gdansk Bridge (Most Gdański) in Warsaw. The survey was conducted from a motorboat with the MALÅ GroundExplorer (GX) georadar system installed with 160 MHz screen antenna. The prospecting down to 7.5 m below the water surface was obtained. The applied methodology allowed to obtain radar echograms indicating the following anomalies: from the river bottom, from cohesive soil (including Neogene clays) and from thresholds (noticeably elevated forms in the bottom). In identifying and interpreting georadar anomalies, archival boreholes data were used.

**Keywords:** ground penetrating radar (GPR) method, Vistula riverbed, erosion processes

W dolinie Wisły w rejonie Warszawy stwierdzono występowanie kilku naturalnych progów (raf), które stabilizują pionowy układ koryta Wisły. Charakteryzują się one tym, że w miejscu ich lokalizacji ujawniono w dnie rzeki niewielką miąższość aluwów i płytkie położenie gruntów trudno rozmywalnych (ryc. 1), które są rozłożone poprzecznie do kierunku biegu rzeki, na całej szerokości koryta (ryc. 2). Strop warstw trudno rozmywalnych na poszczególnych progach zalega na różnych poziomach. Obecność kulminacji podłoża aluwów, zbudowanego głównie z ilów neogeńskich, glin lodowcowych, utworów zastoiskowych oraz plejstocenijskich osadów rzecznych, wpływa na stabilizację erozji wgłębnej oraz różnicowanie stref depozycyjnych w korycie (Falkowski, Ostrowski, 2009).

Stabilność koryta Wisły w Warszawie jest utrzymywana przez progi z nierozmywalnych gruntów, które stanowią jednak przeszkodę nawigacyjną. W okresie międzywojennym pogłębienie miejsc kamienistych, przegradzających szlak wodny nie mogło być prowadzone na szerszą skalę z powodu braku odpowiedniego sprzętu technicznego. Polegało ono w zasadzie na wydobywaniu tylko pojedynczych, mniejszych głazów, a do usuwania większych stosowano metody minerskie. Choć zakres tych prac nie ograniczał się tylko do nurtu rzeki, progi zachowały się i są widoczne, np.

w profilu podłużnym dna (ryc. 3). Na przełomie lat 50. i 60. XX w. wznowiono na szerszą skalę likwidowanie raf kamienistych i pogłębienie koryta, szczególnie na odcinku Cytadela–Żerań (516–520 km biegu rzeki).

Najeżone głazami odcinkowe wypiętrzenia trudno rozmywalnego dna nabrały charakteru bystrzy o stosunkowo małych głębokościach i dużych prędkościach przepływu. Stały się one więc szczególnie niebezpieczne i uciążliwe dla żeglugi. Wielotonowe głazy i kamienie wydobyte z dna, stanowią obecnie zabezpieczenia brzegów i świadczą o znacznym zakresie tych prac. W latach 1989–1991, na odcinku od 509 do 520,5 km biegu rzeki, w ramach prac prowadzonych przy oczyszczaniu szlaku żeglownego z przeszkód podwodnych wydobyto blisko 3 tys. m<sup>3</sup> kamienia, stosując tzw. głębokość zbierania wynoszącą 1 m. Ich celem było uzyskanie żeglugowych głębokości tranzytowych od 1,2 do 1,5 m przy średniej niskiej wodzie (SNW dla wodowskazu Warszawa, ustalona dla okresu 1961–1990 r., wynosiła 151 cm). Prowadzono je na ogół w nurcie rzeki, w strefach lokalnych wypiętrzeń dna. W przeważającej większości były to złoża kamienia naturalnego, zalegające na podłożu trudno rozmywalnym. Z pomiarów rzędnych zwierciadła wody wykonanych we wrześniu 2012 r. wynika, że „rafa” żoliborska nadal wyjątkowo silnie piętrzy wodę niską (ryc. 3).

<sup>1</sup> Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; r.mieszkowski@uw.edu.pl.

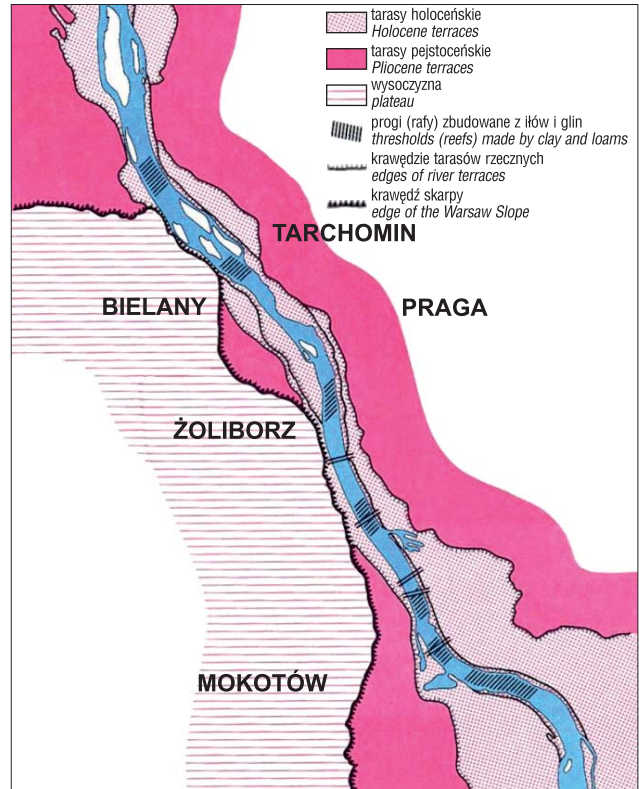
<sup>2</sup> HYDRO4TECH, ul. Balkonowa 5, lok. 6, 03-580 Warszawa.

<sup>3</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 04-694 Warszawa.



**Ryc. 1.** Układ warstw gruntowych w proggu („rafa”) występującej w dnie rzeki Wisły. Zdjęcie wykonane w okresie niżówkowym. Fot. P. Kuźniar

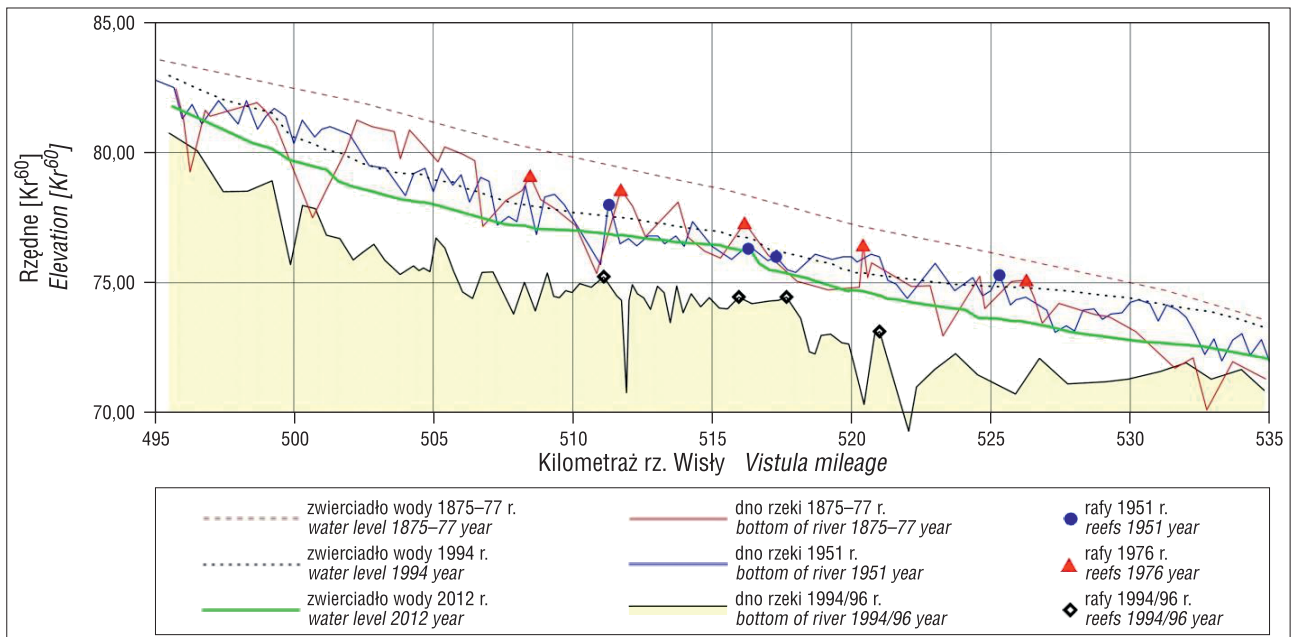
**Fig. 1.** The set of soil layers within the threshold in the Vistula River bottom. The picture was taken during the low river flow period. Photo by P. Kuźniar



**Ryc. 2.** Lokalizacja naturalnych progów z gruntów trudno-rozmywalnych w Warszawie (Falkowski, 1982)

**Fig. 2.** The location of natural thresholds of difficult-to-wash soils in Warsaw (Falkowski, 1982)

W odległości ok. 700 m poniżej Mostu Gdańskiego jest zlokalizowana tzw. rafa, której górna krawędź osiąga najwyższe rzędne spośród wszystkich warszawskich progów (Bara, Walewska, 2013; Sosnowska, 2015). Forma ta jako jedyna tworzy, widoczne zwłaszcza przy małych przepływach, bystrze – kamienisty odcinek o małych głębokościach i dużych prędkościach płynięcia wody w rzece.



**Ryc. 3.** Wybrane profile podłużne dna oraz zwierciadeł wód niskich na odcinku warszawskim Wisły (Kuźniar, 1998; Kowalski i in., 2013)  
**Fig. 3.** Chosen longitudinal profiles of the bottom and low table level along the Vistula River in Warsaw (Kuźniar, 1998; Kowalski et al., 2013)

Jest to struktura szczególnie ważna dla kształtowania przepływów na warszawskim odcinku Wisły. Dzięki niej możliwe jest utrzymanie stabilnego poziomu wody, co jest istotne, zwłaszcza podczas stanów niskich i średnich. W ostatnim stuleciu kilkakrotnie podejmowano próby zlikwidowania wypiętrzeń dna w tym fragmencie rzeki, a zwłaszcza w rejonie Mostu Gdańskiego. Pomimo tych działań, „rafa” nadal pozostaje istotnym elementem budowy koryta rzeki w Warszawie.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości aplikacyjne metody georadarowej do rozpoznania ukształtowania dna rzeki oraz jego budowy geologicznej w pobliżu Mostu Gdańskiego. Metody geofizyczne m.in. metoda georadarowa, umożliwiają poznanie budowy ośrodka geologicznego oraz procesów fizycznych w nim zachodzących bez potrzeby bezpośredniego dostępu do niego za pomocą wykopów, otworów badawczych czy też innych wyrobisk. Zwiększająca się precyzja pomiaru parametrów pól fizycznych ośrodka geologicznego i dostępność złożonych procedur interpretacyjnych stwarzają korzystne warunki dla dalszego rozwoju metod geofizycznych, a tym samym umożliwiają coraz szersze ich zastosowanie w badaniu zjawisk naturalnych i rozwiązywaniu różnych zagadnień środowiskowych. W analizowanym przypadku szczególnie istotna była kwestia sprawdzenia, czy i ewentualnie jak głęboko sięga erozja dna rzeki między filarami mostu. Przedmiotem zainteresowania było również określenie głębokości zalegania stropu iłów neogeńskich. Kontrast parametrów elektromagnetycznych (stałej dielektrycznej i oporności elektrycznej): wody, piasków aluwialnych oraz gruntów spoistych, sprzyjał zastosowaniu metody georadarowej. W analizie obrazu georadarowego udało się wydzielić kilka wyraźnych sygnatur, tj. horyzonty refleksyjne i hiperbole dyfrakcyjne od form dna rzeki.

## METODA GEORADAROWA

Metoda georadarowa należy do grupy geofizycznych metod radiofalowych, pozwalających na bardzo precyzyjne uzyskiwanie liniowych przekrojów głębokościowych. Zasada jej działania polega na wysłaniu w głąb ośrodka geologicznego sygnału elektromagnetycznego, który ulega odbiciu, załamaniu i tłumieniu. Następnie fala odbita jest rejestrowana przez antenę odbiorczą. W wykonanych badaniach zastosowano antenę 160 MHz, co pozwoliło na prospekcję do ok. 6–7 m poniżej lustra wody. Dobre rezultaty badań metodą georadarową uzyskuje się w utworach piaszczystych i żwirach. Właściwe odwzorowanie układu warstw geologicznych jest uzależnione od parametrów fizycznych ośrodka, takich jak stała dielektryczna ( $\epsilon$ ) i oporność elektryczna ( $\rho$ ), z którą jest związany współczynnik tłumienia  $\alpha$ . Wraz ze wzrostem przewodności wzrasta wartość współczynnika tłumienia. Tłumienie powodują różne czynniki, np.: skład mineralny, porowatość, wilgotność oraz temperatura ośrodka skalnego. Występowanie w masywie utworów ilastych, a także słonej wody jest przyczyną wzrostu tłumienia fali elektromagnetycznej, a co za tym idzie spadku zasięgu głębokościowego metody (tab. 1).

Metoda georadarowa stanowi doskonałe narzędzie do lokalizowania w obrębie warstw geologicznych różnego rodzaju zbiorników, pojemników, niewypałów, niewybu-

**Tab. 1.** Wartość przewodności i współczynnika tłumienia różnych ośrodków (Karczewski, 2007)

**Table 1.** Conductivity value and suppression coefficient for different materials (Karczewski, 2007)

Ośrodek <i>Medium</i>	Przewodność <i>Conductivity</i> [mS/m]	Współczynnik tłumienia <i>Damping factor</i> $\alpha$ [dB/m]
Powietrze <i>Air</i>	0,0	0,0
Słodka woda <i>Sweet water</i>	0,5	0,1
Słona woda <i>Salt water</i>	3000	1000
Suchy piasek <i>Dry sand</i>	0,01	0,01
Nasycony piasek <i>Saturated sand</i>	0,1–1,0	0,03–0,30
Iły, gliny <i>Clays, tills</i>	2,0–1000	300

chów, fundamentów, obiekty architektonicznych, pustek, rur, kabli, itp., ponieważ w takich przypadkach występuje wyraźny kontrast względnej stałej dielektrycznej pomiędzy ośrodkiem a poszukiwanym obiektem. Umożliwia także wykonywanie nieniszczących pomiarów ciągłych przy badaniu zjawisk naturalnych (np. układ warstw geologicznych, warunki hydrogeologiczne, kierunki spływu wód podziemnych, rozluźnienia, osłabienia gruntu, różnice w wykształceniu osadów, nagromadzenia gładów, uskoki, pustki, strefy spękań ośrodka skalnego, zasięg i głębokość torfowisk, itp.). Obszerny opis metody georadarowej można znaleźć np. w pracach Jola (2009), Karczewskiego (2007), Karczewskiego i Ziętka (2002), Karczewskiego i in. (2011).

## METODYKA BADAŃ

W tym opracowaniu metodą georadarową zastosowano do badań osadów dennych koryta Wisły. Wykonano je za pomocą profilowania refleksyjnego przy użyciu zestawu MALÅ GroundExplorer (GX) z anteną ekranowaną 160 MHz. Pomiary przeprowadzono z łodzi motorowej o kadłubie z tworzywa sztucznego (ryc. 4). Pozycja motorówki, podczas pomiarów, była śledzona przez system GPS w interwale czasowym co ok. 10 sek. Lokalizacja wykonanych pomiarów georadarowych jest przedstawiona na rycinie 5, natomiast wybrane parametry pomiarów georadarowych zestawiono w tabeli 2. Obraz falowy (echogram), odzwierciedlający wewnętrzną budowę ośrodka, opracowano za pomocą programu RadExplorer, używając następujących filtrów:

- Move starttime – korekcja czasu pierwszego wstąpienia,
- DC-shift – usuwanie stałej składowej sygnału georadarowego,
- Background Removal – usuwanie szumu losowego,
- dekonwolucja – usunięcie wpływu tłumienia fali elektromagnetycznej i zakłóceń wynikających z niejednorodności ośrodka,
- filtracja częstotliwości – usunięcie szumów i wzmocnienie sygnału wybranego zakresu częstotliwości fal,
- wzmocnienie AGC.

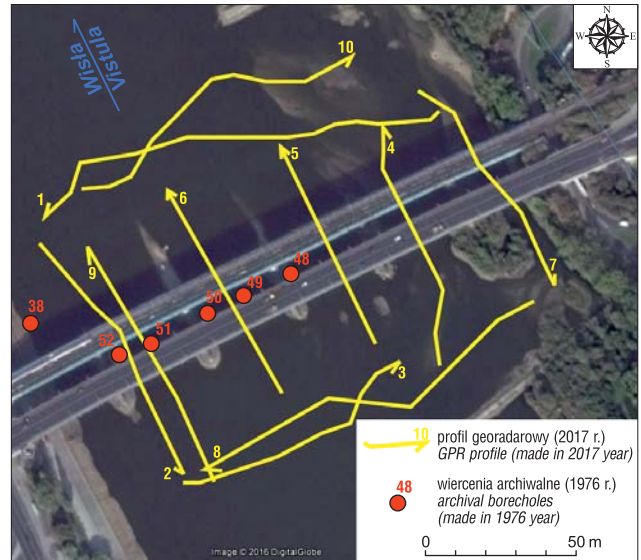


Ryc. 4. Zestaw MALÅ GroundExplorer (GX), 160 MHz przygotowany do pomiarów

Fig. 4. MALÅ GroundExplorer (GX) with 160 MHz antenna georadar system prepared for the measurements

Tab. 2. Parametry pomiarów georadarowych anteną 160 MHz  
Table 2. Settings during the measurement with the 160 MHz antenna

Wzbudzenie sygnału <i>Excitation signal</i>	na czas, co 0,5 s <i>on time, every 0.5 s</i>
Liczba próbek <i>Number of samples</i>	704
Okno czasowe <i>Time window</i>	300 ns
Odległość między trasami <i>Distance between routes</i>	ok. 1–3 cm (zależy od prędkości łodzi) <i>approx. 1–3 cm (depends on boat speed)</i>

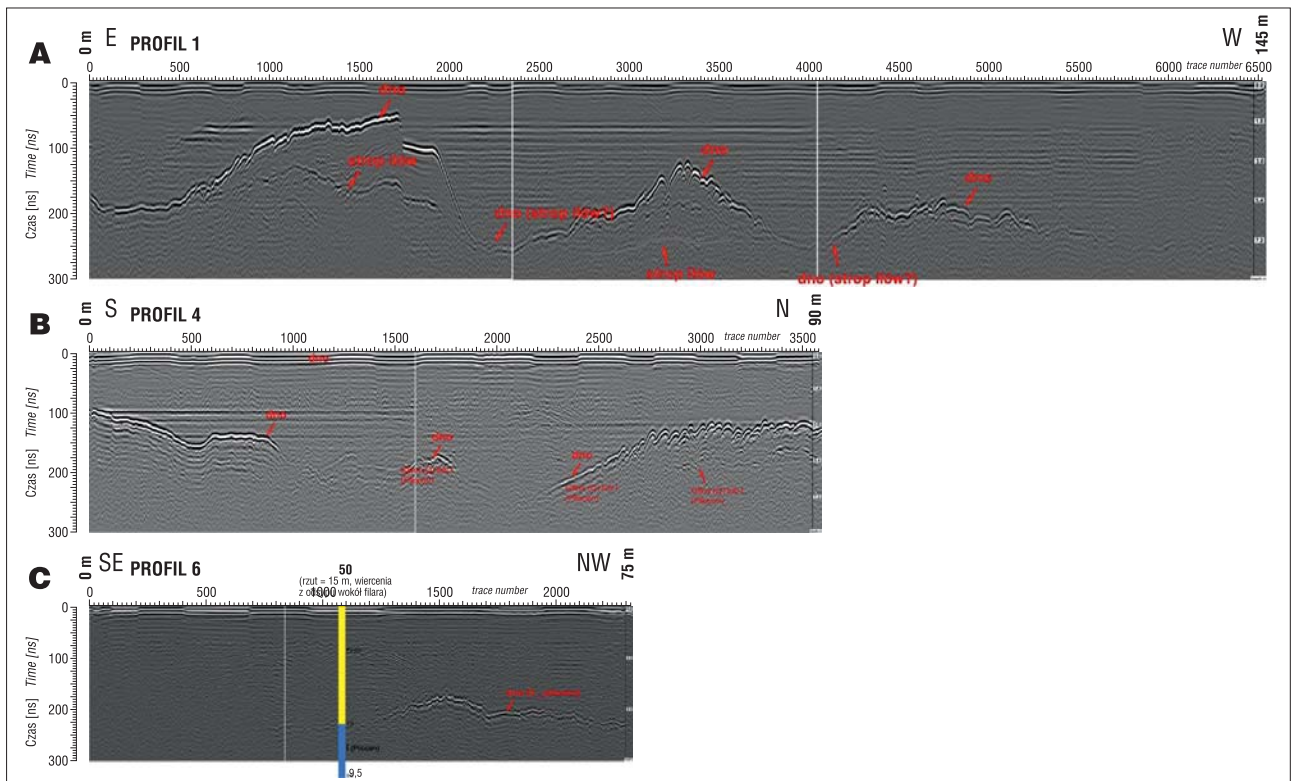


Ryc. 5. Lokalizacja profili georadarowych na tle ortofotografii lotniczej

Fig. 5. The location of georadar profiles on aerial orthophotography

### WYNIKI BADAŃ

Wybrane echogramy georadarowe przedstawiono na rycinach 6A–C. Udało się na nich wyraźnie wyróżnić: refleksy od dna rzeki, refleksy od głębiej położonych granic geologicznych (strop glin i ilów neogeńskich) oraz liczne hiperbole dyfrakcyjne od kamieni zabezpieczających dno rzeki w pobliżu filarów. Na wyróżnionych echogramach uwagę zwraca znaczne przegłębienie dna rzeki między



Ryc. 6. Echogramy (lokalizacja na ryc. 3). A – profil 1, prostopadły do nurtu rzeki, B – profil 4, równoległy do nurtu rzeki, C – profil 6, równoległy do nurtu rzeki

Fig. 6. Echograms (for location see Fig. 3). A – No. 1 profile, perpendicular to the river current, B – No. 4 profile, parallel to the river current, C – No. 6 profile, parallel to the river current



**Ryc. 7.** Obszary występowania wyraźnych przegłębień dna, progów i wyniesień w rejonie mostu w świetle badań GPR

**Fig. 7.** The areas of noticeable bottom depressions, thresholds and elevations in the area of the bridge recorded by GPR survey

filarami mostu, gdzie jest najsilniejszy nurt. Na rycinie 7a, między trasami 1800–2300 dno sięga blisko 7 m poniżej lustra wody. Na rycinie 7c dno rzeki również występuje na głębokości blisko 7 m. Porównanie horyzontu refleksyjnego z archiwalnym wierceniem (56/1976) wykazuje, że odpowiada on stropowi ilów neogeńskich.

Istotna jest też kwestia względnych różnic głębokości dna. Na rycinie 7a można zauważyć, że między trasami 1700–2100, tj. na odcinku ok. 7–8 m, następuje przegłębienie dna o ok. 6 m między filarami. W lokalizacjach pomiędzy filarami mostu (przekroje ryc. 7a i c), prędkość przepływu wody w rzece jest największa, tym samym jest największa erozja dna. Na echogramach widoczne jest dno rzeki na rzędnej stropu warstw trudno rozmywanych. Z echogramów można odczytać brak obecności głazów zabezpieczających dno rzeki w jej nurcie, ponieważ ich obecność manifestowałaby się w formie hiperbol dyfrakcyjnych. Takie głazy widać jedynie w miejscach uspokojenia nurtu, gdzie erozja dna jest słabsza, np. na rycinie 7b między trasami 2700–3400. Dodatkowo na rycinie 8 przedstawiono obszary występowania wyraźnych przegłębień, progów oraz wyniesień w morfologii dna, oparte na wynikach badań georadarowych.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały możliwości aplikacyjne metody georadarowej do określenia wielkości erozji i morfologii dna rzeki. Zidentyfikowano wyraźne strefy przegłębień dna w strefach pomiędzy filarami mostu na rzece Wiśle w Warszawie dochodzące do głębokości blisko 7 m poniżej lustra wody. Dodatkowo, korelacja wyników badań geofizycznych z profilami wierceń umożliwiła określenie występowania stropu ilów neogeńskich. Ich głębokość jest istotna z punktu widzenia projektowania w przyszłości ewentualnych prac związanych z zabezpieczeniem filarów mostu.



**Ryc. 8.** Fragmenty XVII-wiecznych dekoracji rzeźbiarskich znalezionych w 2012 r. na dnie Wisły w Warszawie w okresie niżówkowym. Fot. H. Kowalski (Kowalski i in., 2013)

**Fig. 8.** Pieces of the XVII century sculpture decorations found in 2012 in the bottom of Vistula River in Warsaw during low river flow period. Photo by H. Kowalski (Kowalski et al., 2013)

Kolejnym zastosowaniem metody jest wykorzystanie jej przy projektowaniu prac regulacyjnych i udrażniających koryto rzeki oraz w pracach poszukiwawczych, np. zrównanych elementów architektonicznych podczas „potopu szwedzkiego” (ryc. 8).

Mimo że zaletą metody jest szybki czas wykonywania pomiarów, to czynność ta w silnym nurcie rzeki jest bardzo trudna i niebezpieczna. Szczególnie groźne są pomiary w pobliżu filarów mostu, gdzie płytko występują kamienie oraz niezidentyfikowane odpady, które zagrażają jednostkom pływającym.

Dziękujemy obu Recenzentom za uwagi i tym samym polepszenie treści naszego artykułu.

## LITERATURA

- BARA A., WALEWSKA J. 2013 – Rafa żoliborska jako próg piętrzący, kształtujący warunki przepływu na śródmiejskim odcinku Wisły w Warszawie (km 508–518). Praca magisterska. Wyd. Inst. Bud., Hydrotech. i Inż. Środ. PW. Warszawa
- FALKOWSKI E. 1982 – Wisła Mazowiecka. [W:] Piskozub A. (red.), Wisła. Monografia rzeki. Wyd. Kom. i Łącz., Warszawa.
- FALKOWSKI T., OSTROWSKI P. 2009 – Budowa geologiczna strefy korytowej Wisły warszawskiej i jej znaczenie dla związanej z korytem infrastruktury. Nauka Przyroda Technologie, 3 (3), #82.
- JOL H. (red.) 2009 – Ground Penetrating Radar: theory and application, 1<sup>st</sup> ed., Elsevier
- KARCZEWSKI J. 2007 – Zarys metody georadarowej, Wyd. Nauk-Dydakt. AGH, wyd. I, Kraków.
- KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J. 2002 – Wykorzystanie metody georadarowej w geofizyce środowiska. Publ. Inst. Geoph. Acad. Sc. M-27(352): 223–232.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M. 2011 – Zarys metody georadarowej. Wyd. Nauk.-Dydakt. AGH, wyd. II, Kraków.
- KOWALSKI H., KUŹNIAR P., MAGNUSZEWSKI A. 2013 – Najniższe stany wody Wisły w Warszawie i podwodne odkrycia archeologiczne. Gospodarka Wodna, 1/2013.
- KUŹNIAR P. 1998 – Zmienność pionowego układu dna koryta oraz zwierciadła wody Wisły w rejonie Warszawy. V Sem. Inst. Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego. Ofic. Wyd. PW: 17–28.
- SOSNOWSKA A. 2015 – Wpływ Razy Żoliborskiej na warunki przepływu na śródmiejskim odcinku Wisły w Warszawie (km 508–518). Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus, 14 (1): 179–187.