

Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do oceny warunków przepływu wód w osadach równi zalewowej

Filip Bujakowski¹, Tomasz Falkowski¹



F. Bujakowski

T. Falkowski

The use of airborne laser scanning in the assessment of groundwater flow conditions in floodplain deposits. Prz. Geol., 65: 443–449.

Abstract. The design of geological structure models of contemporary river valleys is largely based on geomorphological analysis. Since the individual valley bottom landforms constituting a record of the evolution of the river system are often characterised by a certain nature of the lithological profile, this analysis can also be useful for determining the variation of filtration conditions in the alluvial layer. The possibilities of landform identification have increased in recent years, mainly due to the dissemination of airborne laser scanning. The paper presents the results of hydrogeological studies conducted using the numerical terrain model along a section of the Middle Vistula River valley near Magnuszew. In this area, flood flows transformed the arrangement of alluvial layers by filling strings of oxbow lakes, reducing the thickness of

loamy alluvial soils, as well as by forming extensive sandy alluvial fans. Deep erosion fissures (crevasses), which are the result of concentrated flood flows, were filled and buried during subsequent swellings by loose alluvia of channel facies. Identification of the diversity of the geological structure of floodplain, conducted based on airborne laser scanning imaging, allowed the creation of a conceptual model of hydrogeological conditions, which takes into account the effects of land-forming activity of flood waters. This model subsequently became the basis for the construction and calibration of the mathematical water filtration model. Detailed identification of the geological structure with the use of remote sensing methods also allowed indication and characterisation of intensified filtration areas in the substrate of flood banks and other flood protection structures. Such phenomena are a threat to their stability.

Keywords: modelling of groundwater filtration, hydrogeological conditions, groundwater, laser scanning, alluvial layer

GeoSym 2016

W trakcie powodzi latem 2010 r. odnotowano w Polsce 672 uszkodzenia i awarie obwałowań, w tym w Dolinie Środkowej Wisły 11 takich incydentów (Kledyński, 2012). Wyniki analizy materiałów archiwalnych oraz przeprowadzonych po powodzi wizji terenowych wykazały (Bujakowski, 2015; Wierzbicki i in., 2012), że awarie te nie nastąpiły na skutek przelania się wody przez koronę wału, lecz filtracyjnych deformacji przebiegających w korpusie lub w podstawie budowli (Wilk, 2003). Pomijając przyczyny awarii wynikające z wad konstrukcyjnych obwałowań, a także uszkodzeń związanych z działalnością małych ssaków (np. bobrów), za główną przyczynę awarii można uznać specyfikę warunków przepływu wód podziemnych w osadach równi zalewowej. Tezę taką potwierdza fakt, że przesiąki pod wałami pojawiają się w czasie kolejnych wezbrań przeważnie na tych samych odcinkach budowli (Wierzbicki i in., 2012).

Modele krążenia wód w aluwialnych warstwach wodonośnych równi zalewowej nie uwzględniają zazwyczaj jej złożonej budowy strukturalnej i litologicznej, która może być efektem ewolucji środowiska fluwialnego w holocenie (Falkowski, 1967, 1971; Starkel, 1983), a także odmienności procesów erozji i depozycji na poszczególnych etapach wezbrania (Zwoliński, 1992). Czynnikiem różnicującym efekty tych procesów w dolinach rzecznych na Niżu Polskim może być ich budowa geologiczna, a szczególnie położenie i kształt stropowej powierzchni podłoża współczesnych

aluwiów (Falkowski, 2007; Falkowska & Falkowski, 2015). Powierzchnia ta, gdy zostanie odsłonięta spod warstwy aluwiów korytowych, może wpływać na układ nurtu wielkich wód. Skoncentrowane przepływy wezbraniowe, powtarzające się w danej strefie, przeobrażają pierwotnie uformowany układ warstw utworów aluwialnych (Falkowska & Falkowski, 2015). Warunki przepływu wód podziemnych w osadach równi zalewowej w znacznym stopniu zmieniają rynnny erozyjne rozcinające serie spoistych, słabo przepuszczalnych utworów wezbraniowych, nazywane krewasami (Allen, 1970). W czasie opadania fali wezbraniowej rynnny te są wypełniane luźnymi aluwiami korytowymi i grzebane. Mogą one zatem stanowić strefy skoncentrowanego przepływu wód podziemnych w obrębie równi zalewowej. Dynamiczne przepływy wezbraniowe mogą także deponować na powierzchni równi zalewowej wcześniej pobrany materiał, tworząc np. rozległe stożki napływowe i zmieniając w ten sposób warunki infiltracji wód opadowych oraz przewodność hydrauliczną serii aluwialnej.

Celem badań była identyfikacja zróżnicowania warunków przepływu wód podziemnych w warstwie aluwialnej na podstawie analizy danych z lotniczego skaningu laserowego (*Airborne Laser Scanning* – ALS), a także próba wykorzystania tej metody do identyfikacji odcinków wałów przeciwpowodziowych zagrożonych wystąpieniem deformacji filtracyjnych w ich podłożu.

CHARAKTERYSTYKA TERENU BADAŃ

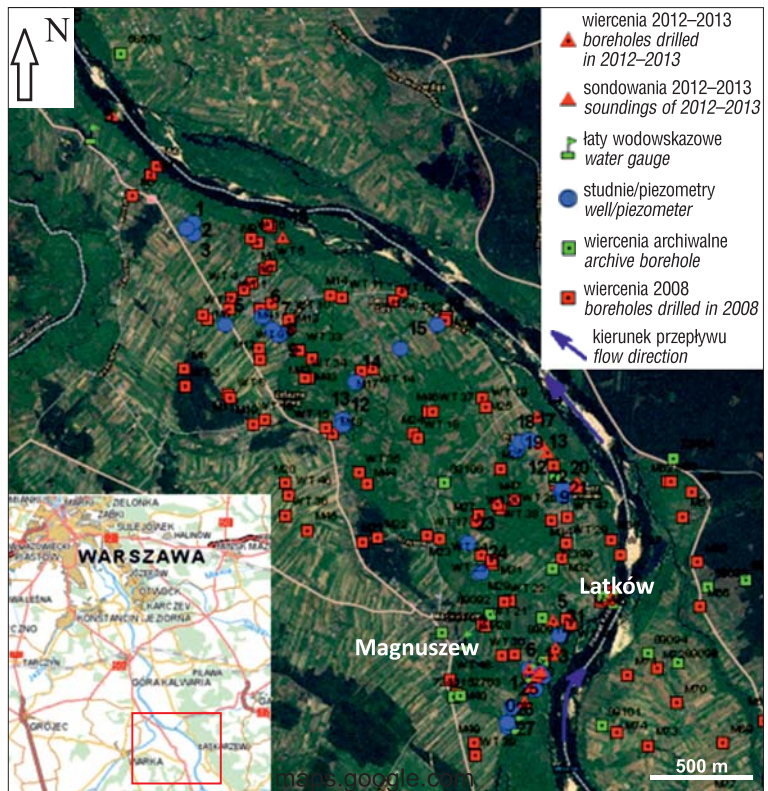
Do badań wytypowano odcinek Doliny Środkowej Wisły pomiędzy ujściem Radomki a ujściem Pilicy (ryc. 1). Ciągnie się on od 437 do 457 km biegu Wisły (kilometrów

¹ Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, filip_bujakowski@sggw.pl.

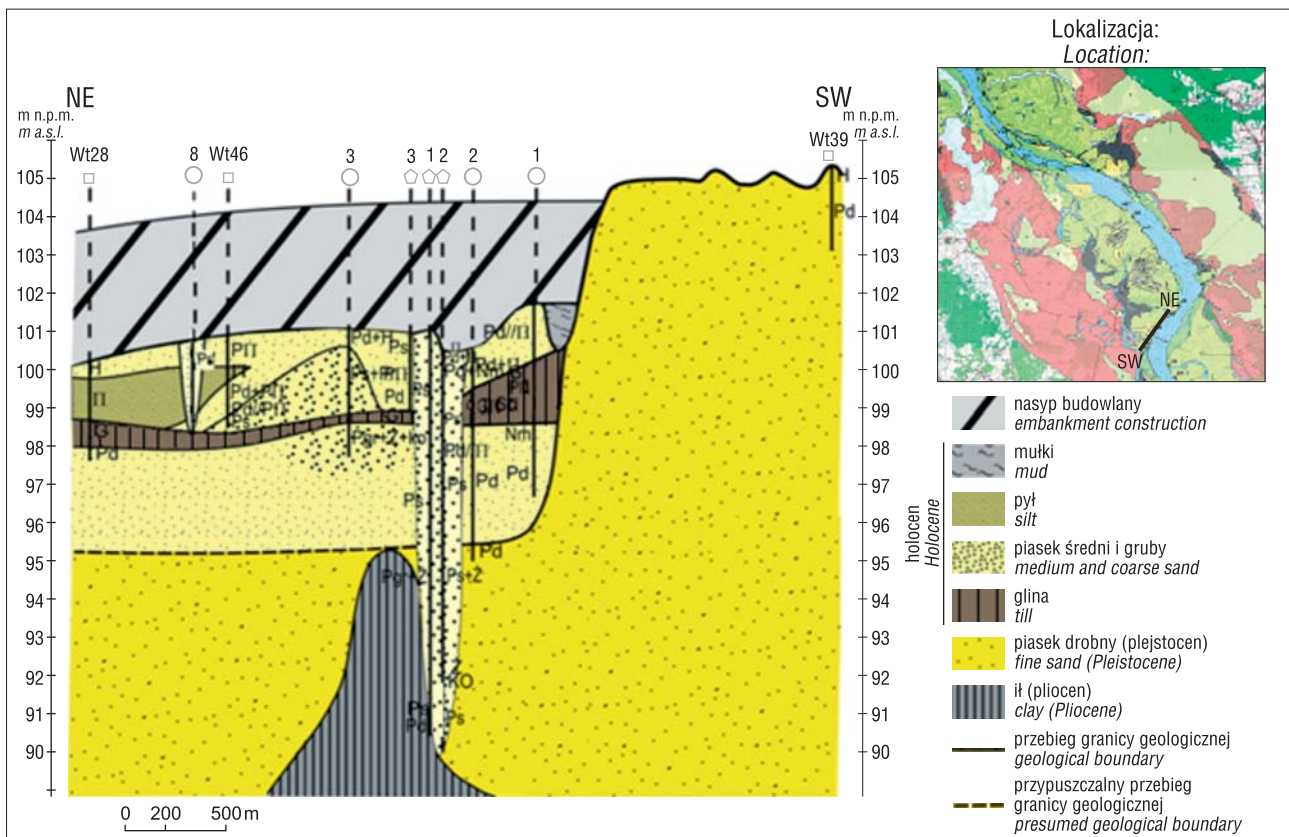
wg RZGW). Lewy brzeg koryta Wisły jest na analizowanym odcinku całkowicie uregulowany. Wybudowano na nim liczne ostrogi i tamy podłużne, których zadaniem jest minimalizacja erozji bocznej. Równia zalewowa została zabezpieczona ciągłym systemem obwałowań.

W granicach poligonu badawczego w podłożu aluwii występują ropy jeziorne pliocenu, przykryte płatami osadów preglacjalnych i lodowcowych (Różycki, 1972; Sarnacka, 1980, 1982). W strefie korytowej badanego odcinka doliny utwory te tworzą morfologiczną kulminację (ryc. 2), która powoduje koncentrowanie się głównego nurtu wielkich wód w rejonie 439 i 444 km biegu Wisły (Falkowski, 2007).

W budowie holocenijskiej równi zalewowej wyraźnie zaznacza się zróżnicowanie litologiczne, które jest efektem ewolucji fluwialnego środowiska doliny Wisły w ciągu ostatnich 10 000 lat. Również tę tworzą piaski korytowe – osady rzeki meandrującej, reprezentujące okres optimum klimatycznego holocenu (Falkowski, 1971), oraz mułki ilaste – osady facji wezbraniowej (mady), o miąższości dochodzącej miejscami do 4 m. W stropowej części osady te zostały przemodelowane przez współczesne przepływy pozakorytowe, do których dochodziło przed wybudowaniem wałów przeciwpowodziowych lub w wyniku ich przerwania (Falkowski,



Ryc. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań
Fig. 1. Documentary map of the study area



Ryc. 2. Przekrój geologiczny wzdłuż podstawy obwałowań Wisły
Fig. 2. Geological cross-section along the Vistula River embankments

2007). W efekcie powodzi mułkowo-ilaste mady zostały częściowo zastąpione współczesnymi mułkami i piaskami. Różnorodność form depozycji i erozji wezbraniowej w

osadach równi była wiązana z wezbrzeniami zatorowymi (Karabon, 1980). Falkowski (2006, 2007) uznał, że do koncentracji rzeźbotwórczej działalności wielkich wód w tym

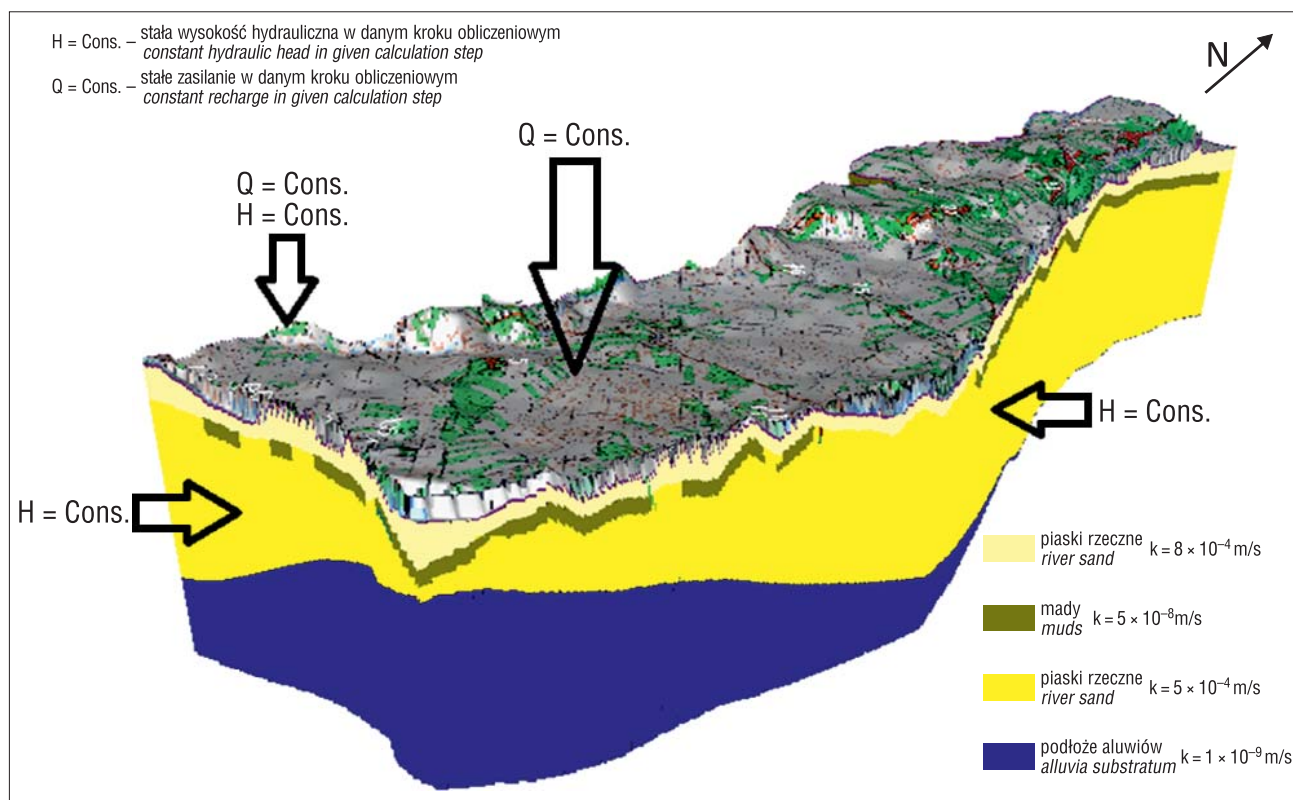
miejscu (także wezbrań zatorowych) przyczynia się oddziaływanie podłoża współczesnych aluwiów. Zjawisko to jest według tego autora przyczyną różnicowania się środowisk depozycyjnych w czasie wezbrań i ma swoje odzwierciedlenie także w geochemicznych cechach osadów pozakorytowych (Falkowska & Falkowski, 2015).

METODYKA BADAŃ

Do konstrukcji modeli budowy geologicznej współczesnych dolin rzecznych w dużym stopniu wykorzystuje się wyniki analizy geomorfologicznej. Ponieważ formy rzeźby dna doliny, stanowiące zapis ewolucji systemu rzeczego, często cechuje określony typ profilu litologicznego (Falkowski, 1971; Myślińska, 1984; Kraużlis i in., 2003), wyniki takiej analizy mogą być także przydatne do określania zróżnicowania warunków filtracji w warstwie aluwialnej. Morfogenezę powierzchni równi zalewowej zdefiniowano na podstawie analizy monochromatycznych zdjęć lotniczych z 1990 r. oraz wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych satelity IKONOS-2 (rozdzielczość przestrzenna – 0,82 m, CE 90 – 4 m, RMSE – 2 m, NMAS – 1 : 5000), wykonanych w dwóch kompozycjach barwnych – w barwach rzeczywistych (RGB) i bliskiej podczerwieni (NRG). Do identyfikacji form rzeźby wykorzystano wyniki wcześniejszych prac prowadzonych w Dolinie Środkowej Wisły (Falkowski, 2006, 2007; Falkowski & Ostrowski, 2010; Falkowska & Falkowski, 2015; Bujakowski, 2015). Podstawowym materiałem do identyfikacji morfotwórczej działalności przepływów wezbraniowych były wyniki lotniczego skaningu laserowego otrzymane w postaci numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT-ASCII GRID) z zasobów Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGIK). Pozyskane dane były

opracowane w ramach projektu ISOK. Obrazy numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) przygotowano za pomocą narzędzia ArcScene, wchodzącego w skład pakietu ArcGis 10. Poprzez pełniejsze uwzględnienie efektów rzeźbotwórczej działalności przepływów wezbraniowych materiały te umożliwiły uzupełnienie opracowanego wcześniej modelu budowy geologicznej Doliny Środkowej Wisły (Falkowski, 2006, 2007; Falkowski & Ostrowski, 2010; Falkowska & Falkowski, 2015).

Do konstrukcji koncepcyjnego modelu warunków przepływu wód w warstwie aluwialnej wykorzystano profile 55 archiwalnych otworów wiertniczych wykonanych w ramach projektu „Związek dynamiki wybranych procesów korytowych ze zróżnicowaniem rzeźby i litologii podłoża aluwiów na przykładzie doliny Wisły od Annopola do Modlina” (KBN 8 TO7G 020 21). Ponadto wykonano 24 nowe badawcze otwory hydrogeologiczne o głębokości od 1,5 do 12 m. W pięciu otworach usytuowanych w sąsiedztwie koryta zainstalowano piezometry (ryc. 2). Prowadzono także okresowe pomiary poziomu wód podziemnych i powierzchniowych w skonstruowanej w ramach badań sieci obserwacyjnej złożonej z 6 tymczasowych łąk wodowskazowych oraz 22 studni gospodarskich (ryc. 1). Wszystkie punkty zostały zaniwelowane i dowiązane do państwowej sieci geodezyjnej. Wartości współczynników filtracji warstw wodonośnych określono na podstawie analizy granulometrycznej. Pozyskane dane zgromadzono w tworzonej na bieżąco bazie danych GIS, co ułatwiło ich przestrzenną analizę i umożliwiło ich dalsze cyfrowe przetwarzanie. Koncepcyjny model warunków hydrogeologicznych, opracowany na podstawie zgromadzonych danych, został wykorzystany do budowy modelu numerycznego (ryc. 3). Skalibrowany model matematyczny umożliwił wielowariantową analizę reakcji systemu



Ryc. 3. Bryła modelu warunków filtracji analizowanej strefy w programie Visual MODFLOW 2009.1
Fig. 3. A lump model of underground water flow of the analysed zone in Visual MODFLOW 2009.1

wodonośnego na przejście fali wezbraniowej. Model ten wykonano za pomocą pakietu oprogramowania Visual MODFLOW 2009.1.

WYNIKI

Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że w obrębie dystalnej równi zalewowej profil litologiczny utworów wezbraniowych tworzą:

1. Mułki ilaste – osad meandrującej Wisły; nieciągła warstwa o miąższości od 0 do 2,8 m; wartość współczynnika filtracji zawiera się w przedziale $2 \cdot 10^{-8}$ do $5 \cdot 10^{-8}$ m/s.

2. Mułki z przeławieniami piasków drobnych i średnich – osad współczesnej rzeki roztokowej, zdeponowany na powierzchni mad gliniastych lub w strefach ich rozmyć; warstwa o miąższości od 0 do 4,5 m; wartość współczynnika filtracji zamyka się w przedziale $8 \cdot 10^{-6}$ do $1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

3. Piaski glifów krewasowych – zdeponowane na stropowej powierzchni gliniastych i pylastych mad; wartość współczynnika filtracji wynosi $7 \cdot 10^{-4}$ do $8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4. Piaski wypełnienia starorzeczy – osad skoncentrowanych przepływów wód wezbraniowych, przeobrażających ciągi starorzeczy; w rejonie Magnuszewa miąższość tych piasków, leżących częściowo na rezydualnym wypełnieniu starorzeczy Wisły, dochodzi do 6 m; wartość współczynnika filtracji wynosi $8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

5. Piaski wypełniające rynny krewasowe – sediment gwałtownej depozycji w czasie opadania fali wezbraniowej; wartość współczynnika filtracji wynosi $7 \cdot 10^{-4}$ do $8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Pod serią utworów wezbraniowych występują osady korytowe wykształcone jako piaski drobne i średnie z domieszką żwirku oraz, szczególnie w strefie współczesnego koryta, z przeławieniami żwirku. Miąższość tych osadów w warunkach średnich stanów rzeki wynosi przeciętnie:

- w strefie korytowej na kulminacji podłoża 0–3 m (kulminacja jest odsłaniana w trakcie wezbrań);
- w strefie korytowej poza kulminacją podłoża 4–5 m;
- w strefie równi dystalnej 2–3 m.

W toku analizy obrazu numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) wykryto na powierzchni badanej równi zalewowej liczne ślady znaczącego jej przeobrażenia przez współczesne przepływy wezbraniowe (ryc. 4). Zaobserwowano także, że rozkład stref współczesnej depozycji wykazuje związek z układem infrastruktury drogowej. Strefy wcięć erozyjnych wyraźnie zaznaczają się na powierzchni równi zalewowej jako ciemnozielone smugi. Na analizowanym obszarze odnaleziono cztery takie strefy.

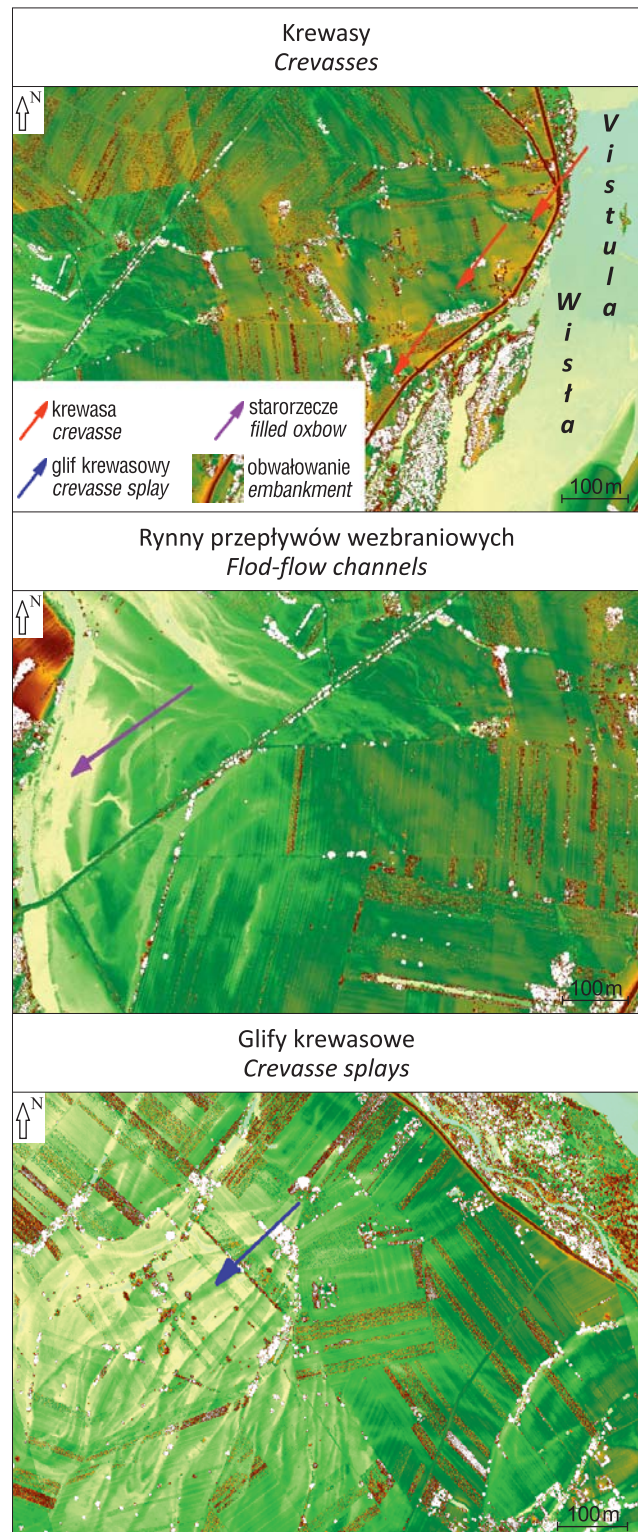
Na podstawie wyników prac modelowych stwierdzono, że w warunkach przepływu korytowego w utworach równi zalewowej stabilizuje się strefa wododziałowa (ryc. 5). Wschodnia część obszaru jest drenowana przez koryto Wisły, natomiast zachodnia przez system przeobrażonych i częściowo wypełnionych starorzeczy, które drenują także wody spływające z plejstocenijskiego tarasu nadzalewowego. Tendencja ta jest najlepiej widoczna podczas niskich stanów Wisły i zanika w trakcie wezbrań, gdy

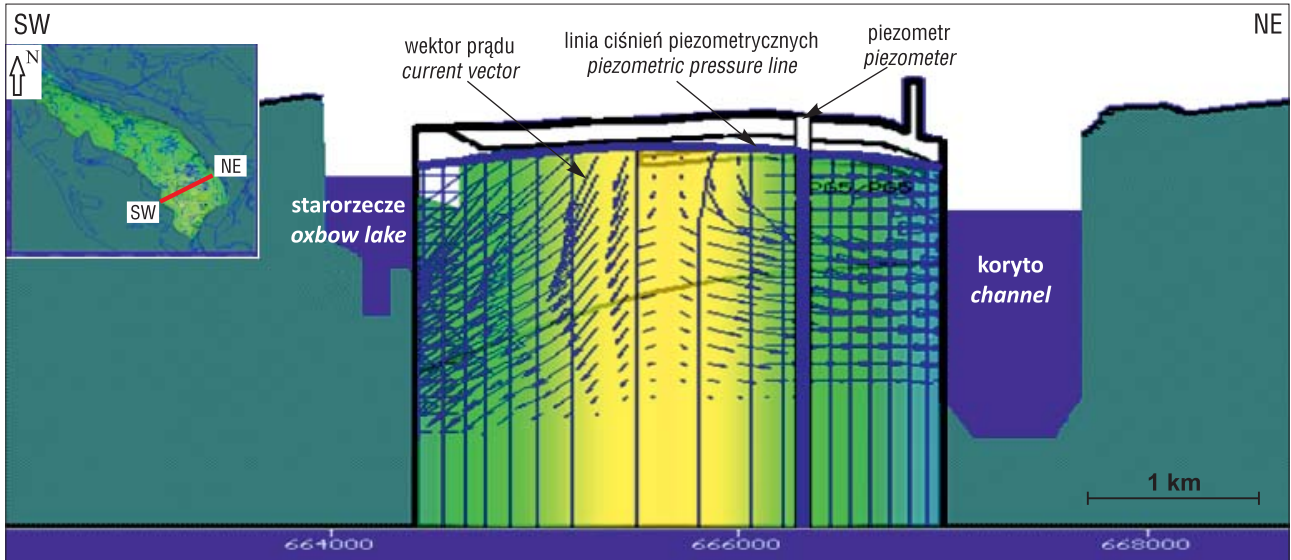
→

Ryc. 4. Obraz NMPT równi zalewowej Wisły na podstawie danych LIDAR

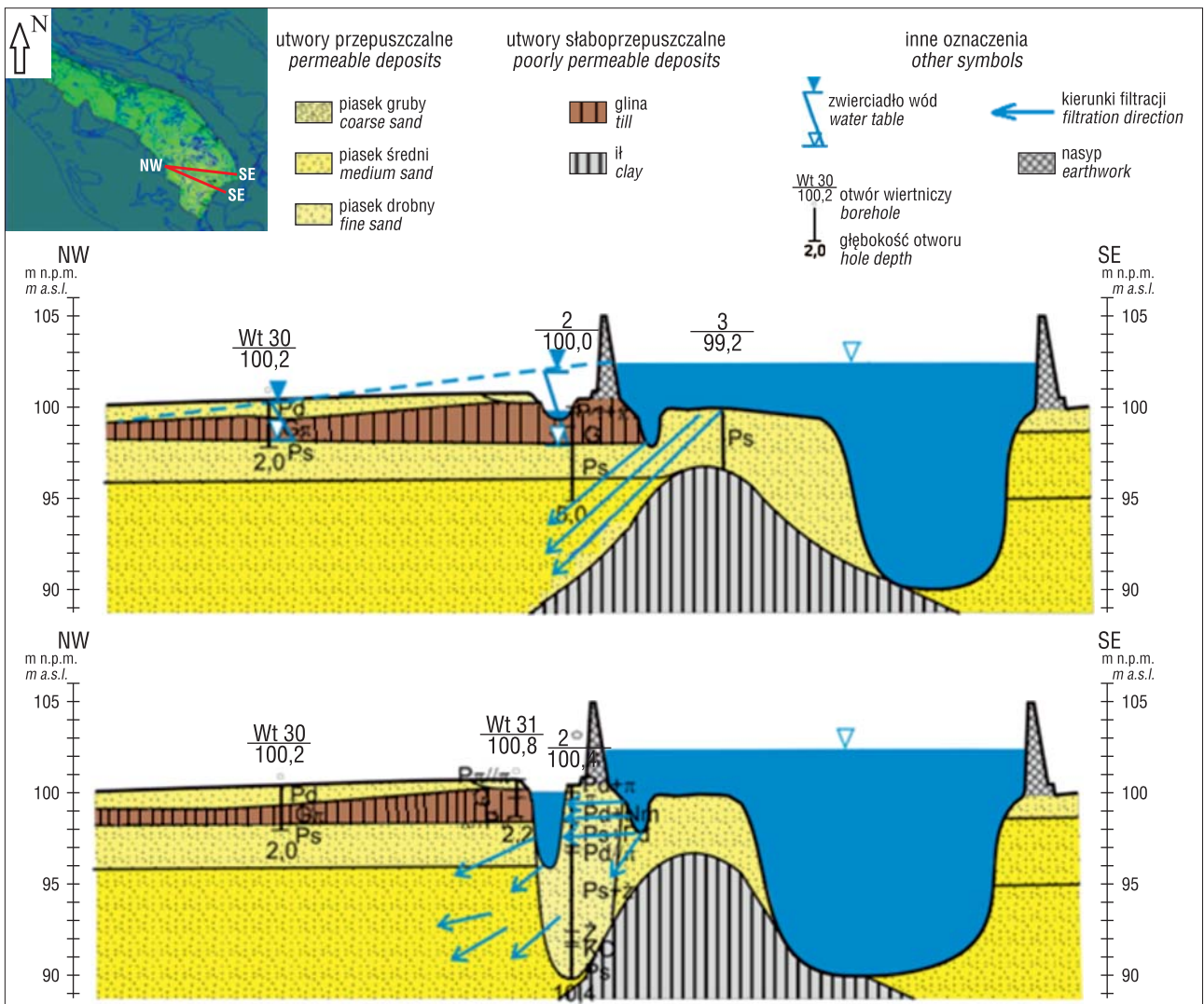
Fig. 4. DEM image of the Vistula floodplain based on LIDAR data

rzeka staje się, przynajmniej w strefie proksymalnej równi zalewowej, wyraźnie infiltrująca. W strefach, w których w sąsiedztwie koryta rzeki występują pokrywy słabo przepuszczalnych, mułkowo-ilastych mad, podczas wysokich stanów wód w niżej leżącej warstwie aluwów korytowych tworzą się warunki naporowe. Natomiast w strefach występowania rynien krewasowych wypełnionych osadami przepuszczalnymi, w warunkach wysokich gradientów hydraulicznych mogą powstawać warunki do przekraczania przez przepływającą pod wałem wodę prędkości krytycznej i inicjowania deformacji filtracyjnych (ryc. 6).

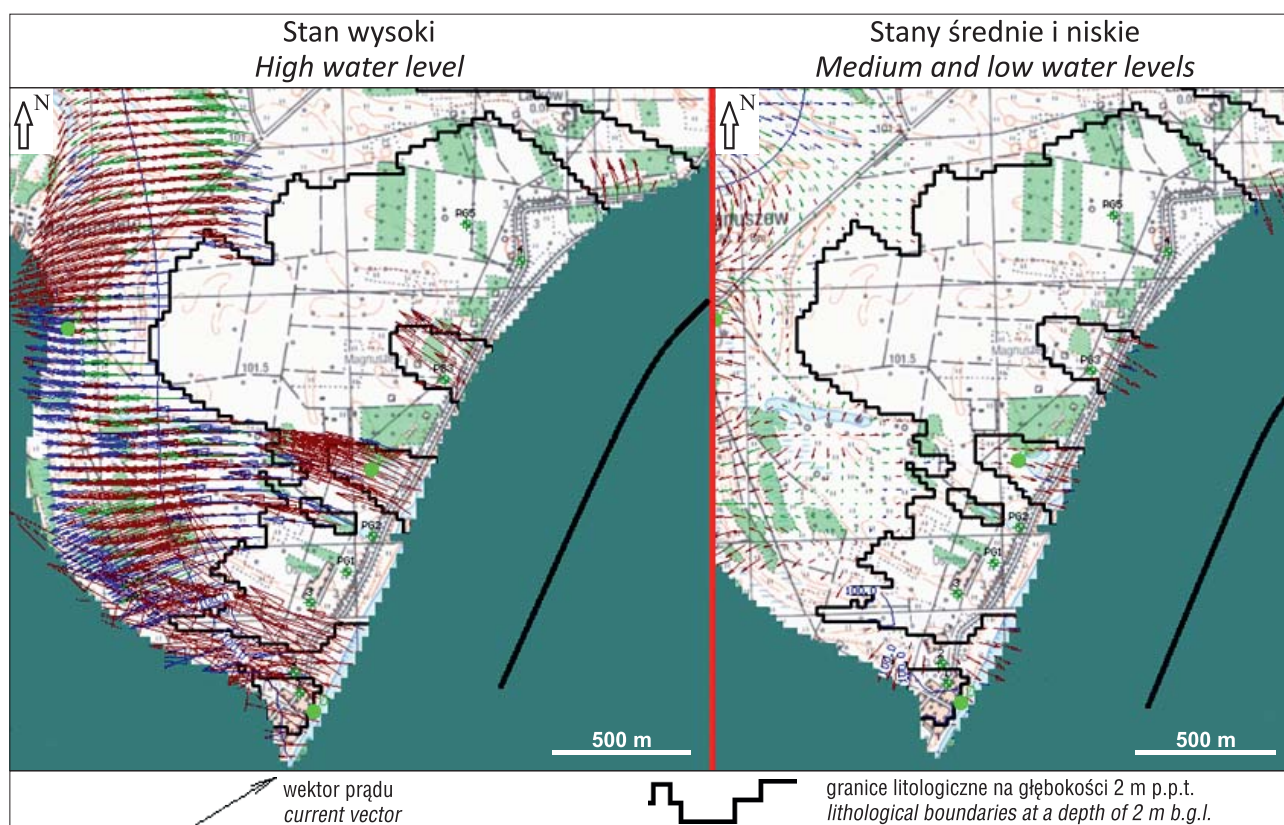




Ryc. 5. Strefa wododziałowa wyznaczona na podstawie wyników badań modelowych
 Fig. 5. Watershed zone delimited based on model tests



Ryc. 6. Zróżnicowanie zasilania warstwy aluwialnej – przekrój
 Fig. 6. Differentiation of alluvial layer infiltration – a cross-section



Ryc. 7. Mapa zróżnicowania zasilania warstwy aluwialnej
Fig. 7. Map of diversity in recharge to the alluvial layer

Dowodem na to są liczne wysięki wód obserwowane w trakcie wezbrań w strefach przywałowych, gdzie znajdują się rynny krewasowe. Prędkość przepływu wód podziemnych w tych strefach jest wyższa od notowanej w miejscach, w których w podłożu wału występują spoiste mady. Zarówno w warunkach niskiego stanu wody w korycie Wisły, jak i wysokiego strefy rynien krewasowych stanowią uprzywilejowane drogi filtracji (ryc. 7).

DYSKUSJA

Obraz numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) otrzymany z ALS umożliwił precyzyjną lokalizację granic tych elementów rzeźby, które stanowią o specyfice warunków krążenia wód w poziomie aluwialnym równi zalewowej. Na obrazie NMPT można było wyznaczyć zasięg glików krewasowych, zbudowanych najczęściej z dobrze przepuszczalnych piasków, a także rynien erozyjnych (krewasów), wypełnionych przepuszczalnymi osadami. Obraz ten umożliwił także identyfikację wpływu infrastruktury technicznej na przestrzenne zróżnicowanie środowisk erozji i depozycji, co może być wykorzystane do konstruowania precyzyjnych scenariuszy postępowania w sytuacjach kryzysowych.

Wyniki badań modelowych wskazują, że przepływy wezbraniowe przeobraziły układ warstw utworów aluwialnych na całym obszarze poligonu badawczego, m.in. poprzez wypełnienie ciągów starorzeczy, redukcję miąższości mułkowo-iłastych mad, a także utworzenie rozległych, piaszczystych stożków napływowych. Głębokie rynny erozyjne (krewasy), będące efektem skoncentrowanych przepływów wezbraniowych, w czasie kolejnych wezbrań

zostały wypełnione luźnymi aluwiami facji korytowej i pogrzebane. Przeobrażenia te w istotny sposób wpłynęły na warunki krążenia wód podziemnych w warstwie aluwialnej.

Formy rzeźby równi zalewowej są odzwierciedleniem specyfiki warunków hydrogeologicznych w aluwialnej strukturze wodonośnej i mogą wskazywać w szczególności na:

- występowanie w rynnach krewasowych stref zintensyfikowanej filtracji zarówno w czasie stanów niskich, jak i w trakcie wezbrań. Identyfikacja takich form ma praktyczne znaczenie w profilaktyce przeciwpowodziowej, ponieważ w ich obrębie może dochodzić do inicjowania deformacji filtracyjnych, zagrażających stabilności budowli ochrony przeciwpowodziowej;
- występowanie stref drenażu wód podziemnych w ciągach starorzeczy przeobrażonych przez przepływy wezbraniowe, stanowiących kolektory drenujące obszar równi zalewowej i przylegającego do nich tarasu wyższego;
- zwiększenie infiltracji efektywnej w strefie występowania na równi zalewowej glików krewasowych w stosunku do infiltracji na nieprzeobrażonych obszarach równi, pokrytych słabo przepuszczalnymi madami.

Jakość i dostępność wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych oraz danych pozyskanych ze skaningu laserowego znacznie wzrosła w ciągu ostatnich 10–15 lat. Dane ALS są dostępne z prawie całego terenu Polski. Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą o przydatności tego typu danych do wstępnej oceny warunków hydrogeologicznych. Wykorzystanie nowoczesnych technik teledetekcyjnych na etapie projektowania zakresu szczegółowego rozpoznania

warunków posadowienia budowli hydrotechnicznych umożliwia wskazywanie stref, w których standardowe badania podłoża takich konstrukcji powinny być zagęszczane (np. Borys & Rycharska, 2006).

WNIOSKI

1. Pomiędzy ujściem Radomki a ujściem Pilicy równia zalewowa doliny Wisły została w istotny sposób przeobrażona przez przepływy wezbraniowe, do których dochodziło przed wybudowaniem wałów przeciwpowodziowych.

2. Wtórnie wypełnione osadami starorzeczka i rynny krewasowe tworzą w obrębie równi zalewowej strefy charakteryzujące się większymi prędkościami przepływu wód, szczególnie w fazie rzeki infiltrującej (towarzyszącej przechodzeniu fali wezbraniowej). Na badanym odcinku doliny Wisły stwierdzono obecność 4 takich form. Miąższość wypełniających je osadów wynosi od 3 do 8 m.

3. Strefy uprzywilejowane do przepływu wód można zatem identyfikować z zastosowaniem analizy morfogenetycznej, prowadzonej na podstawie zdjęć lotniczych i satelitarnych. Szczególnie przydatny do takiej analizy jest obraz dna doliny rzecznej uzyskany z lotniczego skaningu laserowego.

4. Stwierdzona zależność warunków przepływu wód podziemnych od morfogenezy osadów równi zalewowej Wisły sugeruje konieczność włączenia do procedury oceny bezpieczeństwa budowli ochrony przeciwpowodziowej analizy geomorfologicznej.

LITERATURA

- ALLEN J.R.L. 1970 – Physical processes of sedimentation. George Allen and Unwin LTD, London: 24.
- BORYS M. & RYCHARSKA J. 2006 – Ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych i podstawowych budowli wodno-melioracyjnych oraz utworzenie systemu monitorowania urządzeń przeciwpowodziowych. Inst. Mel. Użyt. Ziel., Falenty.
- BUJAKOWSKI F. 2015 – Morfogenetyczne kryteria identyfikacji źróźnicowania filtracji w warstwie aluwialnej na przykładzie doliny środkowej Wisły. Rozpr. doktorska, WBiIS SGGW w Warszawie.
- FALKOWSKA E. & FALKOWSKI T. 2015 – Trace metals distribution pattern in floodplain sediments of a lowland river in relation to contemporary valley bottom morphodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (7): 876–887.
- FALKOWSKI E. 1967 – Ewolucja holocenijskiej Wisły na odcinku Zawichost–Solec i inżyniersko-geologiczna prognoza jej dalszego rozwoju. *Biul. Inst. Geol.*, 198 (4): 57–148.
- FALKOWSKI E. 1971 – Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. *Biul. Geol.*, 12: 5–121.
- FALKOWSKI T. 2006 – Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły Środkowej. *Wyd. SGGW, Rozprawy Naukowe i Monografie*: 128.
- FALKOWSKI T. 2007 – Alluvial bottom geology inferred as a factor controlling channel flow along the Middle Vistula River, Poland. *Geol. Quart.*, 51 (1): 91–102.
- FALKOWSKI T. & OSTROWSKI P. 2010 – Morfogeneza powierzchni tarasu zalewowego Wisły w okolicach Magnuszewa w obrazie zdjęć satelitarnych i lotniczych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, PAN Kraków, z. 9: 89–100.
- KARABON J. 1980 – Morfogenetyczna działalność wód wezbraniowych związana z zatorami lodowymi w dolinie Wisły Środkowej. *Prz. Geol.*, 28: 512–515.
- KLEDYŃSKI Z. 2012 – Awaria i katastrofa obiektu hydrotechnicznego. *Nowocz. Budow. Inż.*, 5 (44): 32–35.
- KRAUŻLIS K., LASKOWSKI K. & WÓJCIK E. 2003 – Variability of engineering geological parameters in flood facies sediments. *Geol. Quart.*, 47 (1): 63–68.
- MYŚLIŃSKA E. 1984 – Kryteria oceny inżyniersko-geologicznych właściwości mad. *Kwart. Geol.*, 28 (2): 143–162.
- RÓŻYCKI S.Z. 1972 – Plejstocen Polski środkowej na tle przeszłości w późnym trzeciorzędzie. PWN, Warszawa.
- SARNACKA Z. 1980 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, Arkusz Magnuszew. Państw. Inst. Geol. Warszawa.
- SARNACKA Z. 1982 – Stratygrafia i charakterystyka litologiczna osadów czwartorzędowych rejonu doliny Wisły na południe od Warszawy. *Biul. Inst. Geol.*, 337: 143–198.
- STARKE L. 1983 – The reflection of hydrologic changes in fluvial environment of the temperate zone during the last 15 000 years. [W:] Gregory J. (red.), *Background to Paleohydrology*. J. Wiley, Chichester: 213–234.
- WIERZBICKI G., OSTROWSKI P., SAMULSKI M. & BUJAKOWSKI F. 2012 – Wpływ budowy geologicznej na warunki przebiegu ekstremalnych wezbrań na przykładzie powodzi 2010 w dolinie Wisły Środkowej i Dolnej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3/III: 27–41.
- WILK T. 2003 – Mikrostrukturalny model sufozji mechanicznej dla potrzeb oceny bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych. Pr. magisterska, Politechnika Warszawska.
- ZWOLIŃSKI Z. 1992 – Sedimentology and geomorphology of overbank flowson meandering river floodplain. *Geomorphology*, 4: 367–379.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.

Akceptowano do druku 4.10.2016 r.