

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Piotr Bartold

Morfodynamika koryta Wisły w Warszawie
i jej znaczenie dla warunków eksploatacji ujęć
poddennych wody

Morphodynamics of the Vistula riverbed in Warsaw and its
importance for the conditions of use of sub-bottom water intakes

Praca doktorska

Doctoral thesis

Praca wykonana pod kierunkiem
prof. dr hab. Tomasza Falkowskiego
Promotor pomocniczy
dr inż. Piotr Siwicki

Katedra Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej,
Instytut Inżynierii Środowiska,
SGGW w Warszawie

Warszawa 2024

Oświadczenie promotora pracy

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data

Podpis promotora pracy

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca doktorska została napisana przez mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora pracy

Streszczenie

Morfodynamika koryta Wisły w Warszawie i jej znaczenie dla warunków eksploatacji ujęć poddennych wody.

Niniejsza rozprawa dotyczy rozpoznania morfodynamiki warszawskiego odcinka koryta Wisły na odcinku między mostem Łazienkowskim, a mostem Siekierkowskim, gdzie znajdują się poddenne ujęcia infiltracyjne Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie. Celem pracy było określenie wpływu budowy geologicznej koryta na dynamikę procesów korytowych i warunki pracy ujęć. W ramach pracy przeprowadzono: pomiary batymetryczne koryta, kartowanie geologiczne w tym wiercenia i pobór próbek do analiz granulometrycznych, przeloty bezzałogowym statkiem powietrznym oraz pomiary gradientometryczne. Zgromadzone podczas badań informacje (dane terenowe i archiwalne) umożliwiły uszczegółowienie obrazu rzeźby i litologii trudno rozmywalnego podłoża aluwialnego, a także określenie jego wpływu na różnicowanie prędkości w korycie w warunkach różnych stanów rzeki, na zmiany morfologii dna i miąższości aluwialnych, oraz zróżnicowanie dynamiki środowisk depozycji aluwialnych korytowych, stanowiących naturalne złoża filtracyjne ujęć.

Słowa kluczowe: morfodynamika koryta rzecznej, ujęcia infiltracyjne, podłożo aluwialne, aluwia korytowe

Streszczenie

Morphodynamics of the Vistula riverbed in Warsaw and its importance for the conditions of use of sub-bottom water intakes.

This dissertation concerns the recognition of the morphodynamics of the Warsaw section of the Vistula channel between Łazienkowski Bridge and Siekierkowski Bridge, where the subbottom infiltration intakes of the Municipal Water and Sewage Company in Warsaw are located. The work aimed to determine the influence of the geological structure on the dynamics of riverbed processes and the operating conditions of the intakes. The work included: bathymetric measurements of the river channel, geological mapping including drilling and sampling for granulometric analyses, unmanned aerial vehicle flights, and gradientometric measurements. The information collected during the research (field and archival data) made it possible to detail the relief and lithology of the erosion-resistant sub-alluvial bedrock as well as to determine its influence on the differentiation of the velocity in the channel under different river conditions on changes in the morphology of the bottom and the thickness of alluvia and on the differentiation of the dynamics of the deposition environments of channel alluvia, which constitute the natural filter bed of the intakes.

Keywords: river channel morphodynamics, infiltration intakes, sub-alluvial bedrock surface, channel allu



Pragnę wyrazić głęboką wdzięczność moim promotorom, profesorowi Tomaszowi Falkowskiemu i doktorowi Piotrowi Siwickiemu, za ich cierpliwość, wsparcie oraz życzliwość okazywaną mi przez cały okres pracy nad rozprawą. Ich wskazówki i cenne uwagi były dla mnie nieocenioną pomocą.

Słowa podziękowania kieruję także do osób, które pomagały mi podczas badań, bez których ukończenie tej pracy nie byłoby możliwe.

Wyrazy wdzięczności kieruję również do Spółki Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie, która umożliwiła mi realizację tematu badawczego. Dzięki współpracy ze Spółką miałem możliwość dostępu do istotnych zasobów i danych, które stanowiły fundament merytoryczny moich badań.

SPIS TREŚCI

1	WSTĘP.....	1
1.1	Wprowadzenie	1
1.2	Cel pracy i hipoteza badawcza	3
2	CHARAKTERYSTYKA ŚRODOWISKOWA OBSZARU BADAŃ	3
2.1	Lokalizacja terenu badań	4
2.2	Ukształtowanie powierzchni otoczenia badanego obszaru	5
2.3	Zarys budowy geologicznej.....	7
2.3.1	Podłoże czwartorzędu	7
2.3.2	Utwory czwartorzędowe	9
2.3.3	Budowa geologiczna strefy korytowej doliny Wisły	9
2.4	Badany odcinek koryta na tle regionalizacji hydrogeologicznej.....	12
2.5	Charakterystyka wód powierzchniowych.....	15
2.5.1	Cieki i zbiorniki wodne	15
2.5.2	Warszawski odcinek koryta Wisły	17
2.6	Charakterystyka wybranych elementów meteorologicznych oraz reżim hydrologiczny analizowanego odcinka wisły.....	18
2.7	Jakość wody w wiśle na odcinku warszawskim.....	24
2.8	Krajobraz i zagospodarowanie obszaru przyległego do koryta.....	25
3	ZASADY DZIAŁANIA UJĘĆ PODDENNYCH W WARSZAWIE NA TLE OGÓLNEGO PRZEGLĄDU METOD UJMOWANIA WÓD RZECZNYCH	27
3.1	RODZAJE UJMOWANYCH WÓD	27
3.2	Rodzaje ujęć	29
3.2.1	Ujęcia wód powierzchniowych	30
3.2.2	Ujęcia infiltracyjne	34
3.2.3	Naturalny filtr rzeczy – charakterystyka strefy hyporeicznej	38
4	CHARAKTERYSTYKA WARSZAWSKICH UJĘĆ INFILTRACYJNYCH	42
4.1	Ujęcie zasadnicze – „Gruba Kaśka”	45
4.2	Ujęcia prawobrzeżne: UU-1 I UU-2.....	47
4.3	Ujęcia lewobrzeżne: PU-1, PU-2, PU-3 I PU-4	49
4.4	Obiekty pływające	51
5	METODYKA I ZAKRES BADAŃ	54
5.1	Badania terenowe	54
5.1.1	Pomiary batymetryczne – echosondaże	54
5.1.2	Kartowanie geologiczne	56
5.1.3	Przeloty bezzałogowym statkiem powietrznym.....	56
5.1.4	Pomiary gradientomierzem konstrukcji prof. M. Marciniaka.....	57

5.2	Badania laboratoryjne – analizy granulometryczne	58
5.3	Budowa bazy gis i opracowanie wyników	59
5.3.1	Morfologia dna – mapy hipsometryczne.....	60
5.3.2	Wykonanie przestrzennego modelu budowy geologicznej oraz powierzchni stropu utworów trudno rozmywalnych	66
5.3.3	Określenie miąższości i objętości aluwiiów	66
5.3.4	Ustalenie zasięgu oddziaływania ujęć infiltracyjnych na złoża aluwialne.....	67
5.3.5	Uzyskanie rozkładu prędkości przepływu wody w korycie – modele 2D	68
5.3.6	Określenie rozkładu prędkości przepływu wody nad kulminacjami utworów trudno rozmywalnych – model 3D	70
6	WYNIKI BADAŃ.....	71
6.1	Morfologia koryta.....	71
6.2	Budowa geologiczna obszaru badań.....	73
6.3	Oddziaływanie ujęć na dynamikę wód podziemnych	79
6.4	Rozkład prędkości wody w korycie.....	82
7	DYSKUSJA	86
7.1	Warunki pracy ujęć.....	86
7.2	Znaczenie podłoża aluwiiów dla morfodynamiki.....	88
7.3	Związek zróżnicowania prędkości przepływu w korycie z morfodynamiką.....	89
7.4	Znaczenie strefy hyporeicznej	90
7.5	Wpływ prac naprawczych oraz obecnej w korycie infrastruktury na warunki eksploatacji ujęć	91
7.6	Możliwości lokalizacji kolejnych ujęć infiltracyjnych na odcinku Wisły warszawskiej	92
8	WNIOSKI.....	94
9	LITERATURA:.....	97

1 WSTĘP

Niniejsza praca doktorska została wykonana w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. Tomasza Falkowskiego oraz promotora pomocniczego dr. inż. Piotra Siwickiego. Temat pracy uzyskał wsparcie w programie stypendialnym Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie. Opiekunem stypendysty (autora pracy) ze strony spółki MPWiK był pan Grzegorz Stępiński.

Praca dotyczy wpływu morfodynamiki* koryta Wisły w Warszawie na eksploatację zespołu siedmiu ujęć infiltracyjnych czerpiących wodę spod dna rzeki, stanowiących główne źródło zaopatrzenia w wodę dla Warszawy i pobliskich miejscowości takich jak Pruszków, Piastów czy Michałowice.

*Słowo "morfodynamika" pochodzi z połączenia dwóch greckich wyrazów:

"morphē" (μορφή) – oznaczającego „kształt” lub „forma”,

"dynamis" (δύναμις) – oznaczającego „siła” lub „ruch”.

Razem termin ten odnosi się do badania sił i procesów wpływających na formowanie i przekształcanie struktur powierzchniowych Ziemi. Morfodynamika opisuje więc dynamiczny charakter zmian form geomorfologicznych, takich jak koryta rzeczne, brzegi morskie czy wydmy, pod wpływem procesów fizycznych i biologicznych (Banach 1994, Allen 2000). Morfodynamika odnosi się do procesów takich jak erozja, transport osadów, akumulacja materiałów, a także oddziaływanie przepływów wody, klimatu oraz działalności człowieka. Morfodynamika pozwala zrozumieć, jak zmiany morfologii i w strukturze wpływają na środowisko i jak mogą oddziaływać na eksploatację zasobów naturalnych oraz ochronę infrastruktury.

1.1 Wprowadzenie

Wisła odgrywa kluczową rolę w zaopatrzeniu w wodę aglomeracji warszawskiej. Historycznie i współcześnie jest głównym źródłem wody dla stolicy oraz jej okolic, a jej znaczenie w przyszłości nie ulegnie zmianie. Dynamiczny rozwój Warszawy, wzrost liczby mieszkańców odnotowywany w ostatnich latach przez Główny Urząd Statystyczny (stat.gov.pl), przekładają się na coraz większe zapotrzebowanie na wodę wymuszając konieczność stałego zwiększania poziomu jej eksploatacji.

Na przestrzeni ostatnich lat coraz wyraźniej dostrzegalne są skutki zmian klimatycznych, negatywnie wpływających na proces ujmowania wody systemem ujęć infiltracyjnych (Pacholec, Zdanowicz 2008). Także na opisywanym w niniejszej pracy odcinku zwiększa się prawdopodobieństwo występowania problemów w poborze wody spod dna Wisły,

głównie ze względu na dominację długotrwałych stanów niskich (Kaznowska, Wasilewicz 2020). Zachodzące zmiany wymagają odpowiednich działań w tym także poszukiwania perspektywicznych miejsc pod budowę nowych ujęć, które zapewnią większe bezpieczeństwo w zaopatrzeniu Warszawy w wodę.

Dla morfodynamiki analizowanej w pracy odcinka koryta Wisły warszawskiej od lat 50 ubiegłego wieku uregulowanego (Kuźniar 1997) decydujące znaczenie ma morfologia trudno rozmywalnego podłoża aluwiów korytowych oraz oddziaływanie budowli hydrotechnicznych. Wskutek wprowadzonej regulacji rzeki na badanym odcinku szerokość koryta średniej wody miejscowo zmniejszono nawet o połowę, powodując zwiększenie prędkości przepływu (Gutry-Korycka i in. 2006). Spowodowało to zwiększenie natężenia erozji dennej zwłaszcza w linii nurtu (Popek i in. 2008). System budowli regulacyjnych projektowany był dla dominujących stanów i przepływu rzeki – średniego. Obecnie przez większość dni w roku odnotowuje się stany niskie - powiązane genetycznie z występowaniem długotrwałych okresów susz hydrologicznych. W takich warunkach oddziaływanie budowli regulacyjnych (np. ostróg) i elementów budowy geologicznej powodować może formowanie się rozległych stref stagnacji wód w korycie, co z kolei powoduje zmniejszenie frakcji deponowanych w sąsiedztwie ujęć osadów korytowych. Zjawiska te powodują pogorszenie warunków infiltracji wód rzecznych do ujęć, a także pogorszenie się ich jakości. Aluwia korytowe pełniące funkcję złoża filtracyjnego muszą spełniać określone wymogi, aby eksploatacja była prowadzona na odpowiednim poziomie efektywności i z zachowaniem wysokiej jakości ujmowanej wody.

Aby skutecznie przeciwdziałać niepożądanym zmianom w korycie i odpowiednio dobierać strategie zarządzania pracą ujęć, konieczna jest wiedza na temat uwarunkowań współczesnych procesów erozji i depozycji w korycie Wisły. Tylko poprzez kompleksową analizę zarówno naturalnych, jak i indukowanych/modyfikowanych przez człowieka procesów, możliwe będzie opracowanie skutecznych rozwiązań mających na celu ochronę i poprawę warunków wymiany aluwiów korytowych oraz zapobieganie dalszej degradacji koryta rzeki (Leopold, Wolman, Miller 1964)

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań, których celem było zrozumienie procesów przebiegających w korycie Wisły na badanych fragmencie jej warszawskiego odcinka. Wśród najistotniejszych wykonanych badań było: rozpoznanie budowy geologicznej koryta, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni stropowej trudno rozmywalnego podłoża współczesnych aluwiów korytowych, określenie dynamiki zmian morfologii dna przy różnych stanach rzeki, oszacowanie miąższości i objętości aluwiów, wyznaczenie w oparciu

o modelowanie hydrodynamiczne rozkładu prędkości przepływu wody w korycie i powiązanie go z charakterystyką granulometryczną aluwiów korytowych stanowiących złoża filtracyjne ujęć. Badano także zasięg oddziaływania ujęć na interakcje pomiędzy wodami podziemnymi i powierzchniowymi w brzegowej strefie koryta.

1.2 Cel pracy i hipoteza badawcza

Głównym celem pracy jest określenie związku pomiędzy morfodynamiką koryta Wisły w Warszawie na odcinku między mostami Siekierkowskim, a Łazienkowskim, a warunkami eksploatacji systemu ujęć poddennych Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji, znajdującego się na tym odcinku. Badany odcinek leży w obrębie warunkowanego budową geologiczną (Falkowski 1990) zwężenia pasa współczesnej równi zalewowej nazywanego „gorsetem warszawskim” (Różycki 1971). Morfologia koryta jest tu silnie związana z jego budową geologiczną, a szczególnie z morfologią i litologią podłoża aluwiów, które tworzy w korycie morfologiczną kulminację (Falkowski 1990, Falkowski 2006, Falkowski Ostrowski 2012). Celem pracy jest określenie w jaki sposób budowa geologiczna koryta oraz jego aktualne zagospodarowanie wpływają na warunki eksploatacji ujęć w zmiennych warunkach przepływu rzeki.

W pracy przeanalizowano następujące zagadnienia:

- Zmiany morfologii dna w korycie Wisły w czasie i ich związek litologią i morfologią powierzchni stropowej podłoża aluwiów.
- Morfodynamikę poszczególnych stref koryta, a w szczególności rozkład prędkości przepływu wody w korycie dla różnych stanów oraz wyznaczenie/identyfikacja stref intensywnego tranzytu rumowiska oraz stref stagnacji wód

Podstawą prowadzonych badań była hipoteza zakładająca, iż:

Charakter procesów współczesnej erozji i depozycji przebiegających w serii aluwiów korytowych Wisły stanowiących naturalne złoża filtracyjne zespołu ujęć poddennych warunkowany jest rzeźbą i litologią powierzchni stropowej ich trudno rozmywalnego podłoża oraz oddziaływaniem związanej z korytem infrastruktury.

Znajomość morfodynamicznej specyfiki koryta może być przydatna w racjonalizacji pracy ujęć poddennych wody w Warszawie.

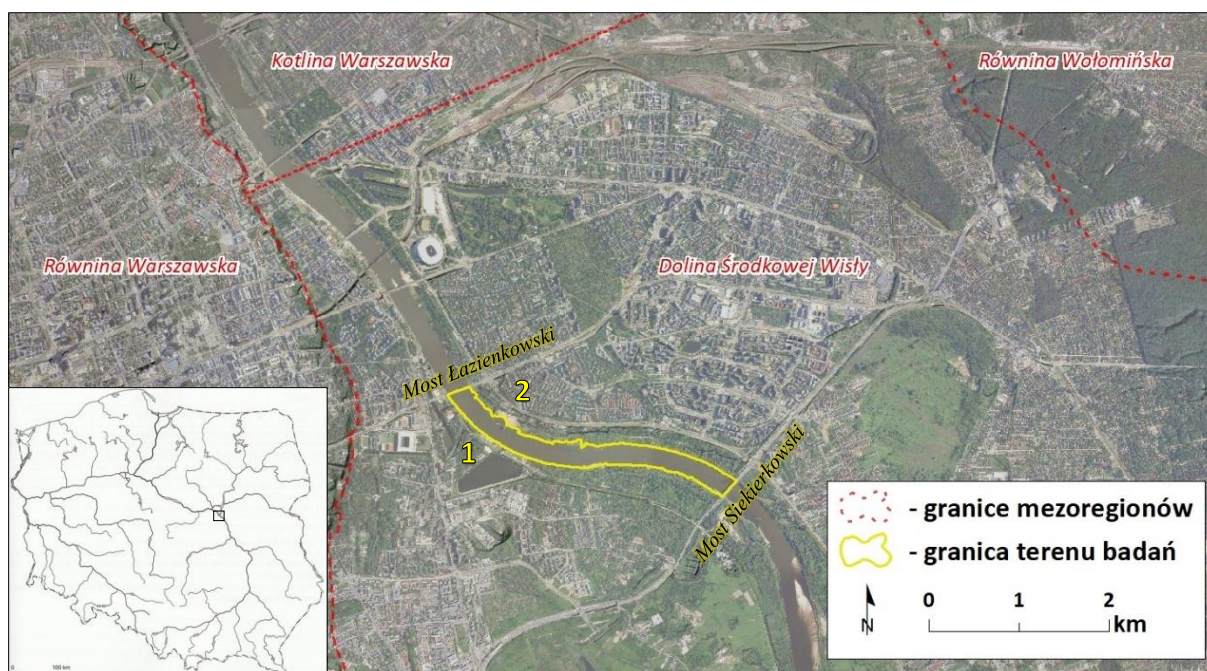
2 CHARAKTERYSTYKA ŚRODOWISKOWA OBSZARU BADAŃ

2.1 Lokalizacja terenu badań

Badany odcinek koryta Wisły znajduje się w administracyjnych granicach województwa mazowieckiego, miasta stołecznego Warszawy, między mostem Łazienkowskim, a mostem Siekierkowskim, na granicy trzech dzielnic: Śródmieścia, Mokotowa i Pragi Południe. W pobliżu analizowanego obszaru, po lewej stronie koryta rzeki zlokalizowana jest Stacja Pomp Rzecznych, zaś po prawej za Wałem Miedzeszyńskim ulokowana jest Stacja Uzdatniania Wody Praga. Oba wymienione obiekty należą do Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w m. st. Warszawa (Rys. 1).

Zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym Polski (Kondracki, 2001) omawiany obszar położony jest w mezoregionie Doliny Środkowej Wisły (318.75), sąsiadującym od zachodu z Równiną Warszawską (318.76), od północy z Kotliną Warszawską (318.73) oraz od wschodu z Równiną Wołomińską (318.78), (Rys.1). Wymienione mezoregiony wchodzą w skład makroregionu Nizin Środkowomazowieckich (318.7), w obrębie podprovincji Nizin Środkowopolskich (318), na obszarze prowincji Niziny Środkowoeuropejskiej (31).

Analizowany fragment koryta Wisły znajduje się między 507, a 511 kilometrem jej biegu. Koryto ma na tym odcinku kierunek SE-NW. Długość badanego odcinka koryta Wisły wynosi ok. 3,3 km. Powierzchnia koryta w warunkach niskich stanów wynosi ok. 0,78 km².



Rys. 1 Lokalizacja terenu badań na tle fizycznogeograficznego podziału Polski (Kondracki, 2001) oraz na ortofotomapie (2022) i numerycznym modelu terenu (1 -Stacja Pomp Rzecznych, 2 – Stacja Uzdatniania Wody – Praga)

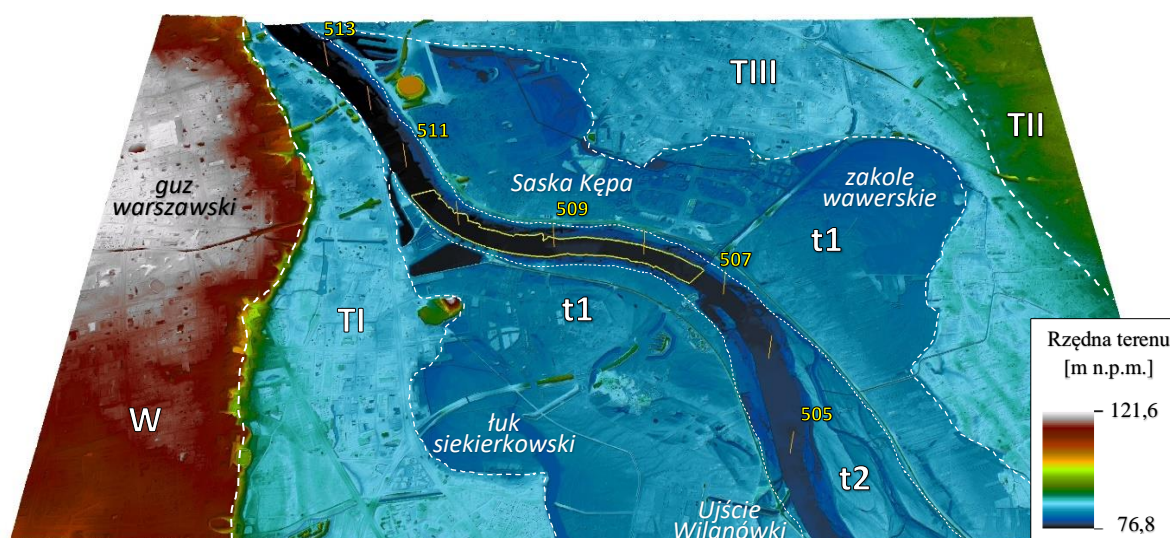
2.2 Ukształtowanie powierzchni otoczenia badanego obszaru

Charakter rzeźby tej strefy tak charakteryzował geomorfolog i archeolog Ludwik Sawicki (1893-1972):

„Teren Warszawy przedstawia wyspowe wzniesienie na lewym wysokim brzegu Wisły, istotnie o charakterze przyczółkowym, które zapewniało grodowi warszawskiemu pozycję panującą nad okolicą i dużym odcinkiem doliny Wisły: nad jej niskim prawym brzegiem – tarasem, na którym przywileje króla Władysława IV powołane zostało do życia w 1648 r. miasta Praga i stąd nazwa tarasu, który zajmuje, dodajemy – akumulacyjnego – taras praski nadana mu przez J. Samsonowicza.” (Sawicki 1960).

Teren badań (Rys. 2) zlokalizowany jest w dolinie Wisły, przy jej zachodniej granicy z wysoczyzną lodowcową (Sarnacka 1980). Dominującymi formami rzeźby na tym obszarze są tarasy zalewowe i nadzalewowe oraz krawędzie erozyjne i erozyjno-denudacyjne (Richling i in. 2021). W obrębie wysoczyzny morenowej wyróżniono (Sarnacka 1990) takie formy rzeźby jak kemy, pagórki akumulacji szczelinowej oraz zagłębienia po martwym lodzie. Formy te na obszarze Warszawy są słabo czytelne ze względu na znaczny stopień przeobrażenia związanego z zabudową (Wierzbicki i in. 2021). Najwyższe rzędne powierzchni wysoczyzny w sąsiedztwie doliny Wisły posiada rejon Starego Miasta (ok. 121 m n.p.m.). Obszar ten nazwany został przez Różyckiego (1972) „guzem warszawskim” (Rys. 2).

Stroma skarpa wysoczyzny pocięta jest erozyjnymi dolinkami, których dnem bieżą obecnie między innymi ulice Tamka (Bajda, Falkowski 2014), czy Królewska (Sarnacka 1980).



Rys. 2 Obszar badań na tle jednostek geomorfologicznych / tarasów rzecznych Wisły (za Sarnacką 1990) na NMT. T I – taras plejstocenijski najwyższy (otwocki), T II – taras plejstocenijski wyższy (falenicki), T III – taras plejstocenijski niższy (praski), t1 – taras zalewowy wyższy, t2 – taras zalewowy niższy, W – wysoczyzna, żółtą czcionką zaznaczono kilometrą Wisły wg RZGW.

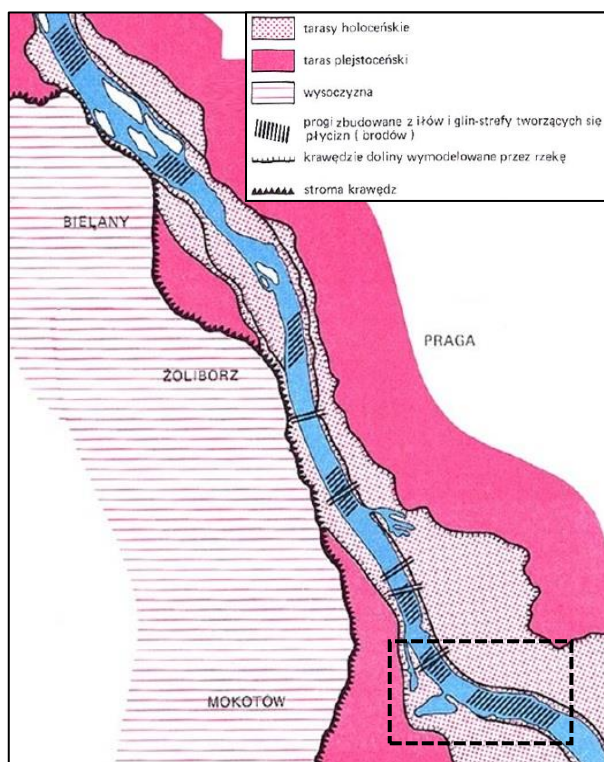
W dolinie Wisły wydzielono (Biernacki 1971, Sarnacka 1980) plejstoceny tarasy nadzalewowe: niższy – TIII, wyższy – TII i najwyższy – TI. Na ich powierzchniach znajdują się wydmy i pola piasków przewianych. Pola wydmy znajdujących się najniższym tarasie plejstoceny noszą ślady rozmycia przez holoceny przepływy wezbraniowe (Kuźniar 1997, Wierzbicki i inni 2021). Na powierzchni tarasów znajdują się także doliny niewielkich dopływów Wisły.

W obrębie holoceny równi zalewowej (tarasu zalewowej) wydzieliła się (Sarnacka 1980) dwie powierzchnie: wyższą t2 i niższą t1. Trzy poziomy w obrębie tarasu zalewowej wydzielił Biernacki (1971). Są to tarasy kiełpiński, czerski i współczesny.

W obrębie doliny najwyższym obiektem jest Kopiec Powstania Warszawskiego, którego wysokość wynosi około 121,6 m n.p.m. Przylegająca do analizowanego w pracy fragmentu doliny wysoczyzna posiada rzędne nie przekraczające 114,4 m n.p.m.

Charakterystyczną cechą doliny Wisły na odcinku warszawskim jest zmienna szerokość pasa równi zalewowej (Rys.2 i 3). W okolicach 505 km Wisły na wysokości ujścia Wilanówki, szerokość tej formy wynosi prawie 4 km. W okolicach 507 km Wisły, na wysokości tzw. Zakola Wawerskiego szerokość równi zalewowej jest największa na tym obszarze i wynosi około 6,7 km (Wierzbicki i in. 2021). Od kilometra. 509,6 (na wysokości Saskiej Kępy) zaczyna się fragment najbardziej zauważalnego zwężenia równi zalewowej (tarasu zalewowej) nazywane „gorsetem warszawskim”. Minimalna szerokość holoceny poziomu wynosi tu około 400 metrów (Rys. 3) (Różycki 1971, Falkowski 1990).

Na odcinku miejskim zmienia się także szerokość koryta średniej wody. Prace regulacyjne prowadzone przede wszystkim w latach 70-tych ubiegłego wieku i polegające głównie na zabudowie brzegów systemem tam poprzecznych i podłużnych spowodowały zwężenie koryta z 340 do 220 metrów (Popek i inni 2009, Kuźniar 1997). Powyżej ujścia



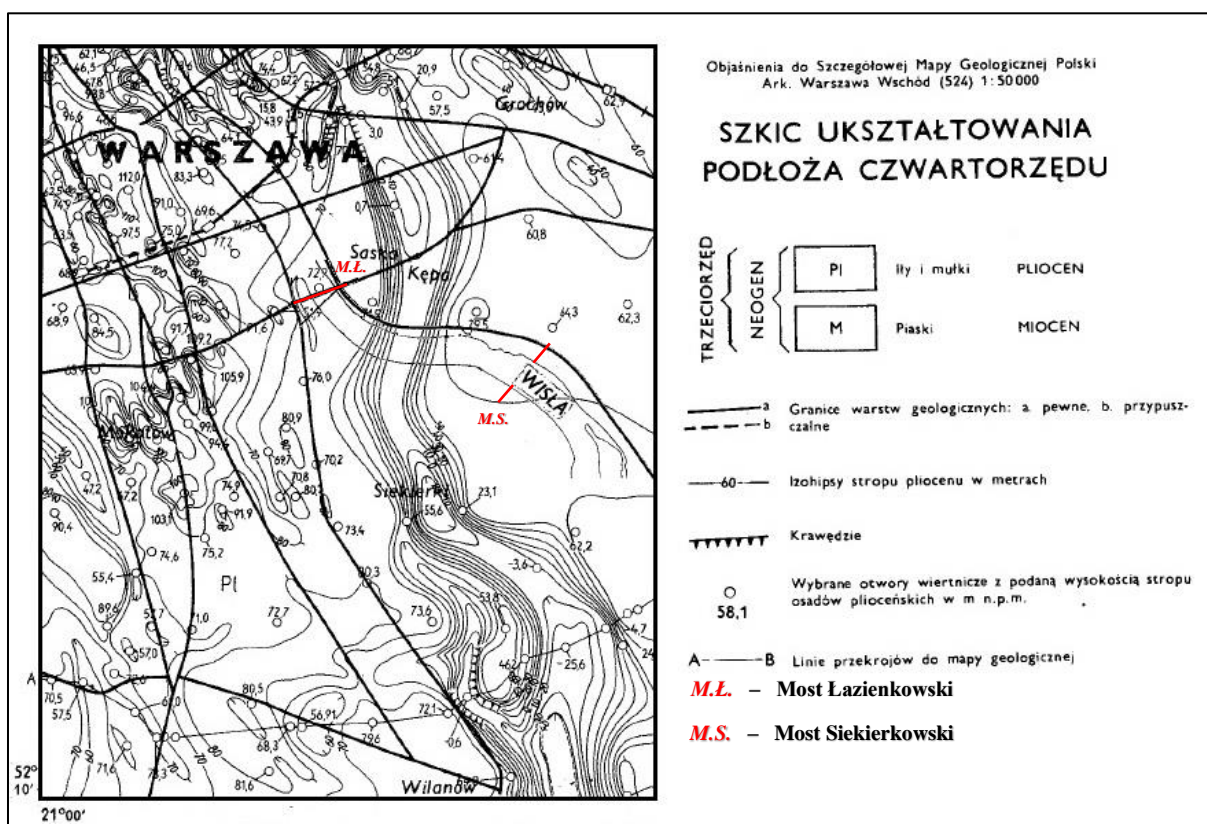
Rys. 3 Gorset Warszawski (Falkowski 1982), obszar badań zaznaczony czarnym prostokątem

Wilanówki oraz poniżej portu Żerańskiego koryto uregulowane rozszerza się nawet do 700 metrów (Rys.2).

2.3 Zarys budowy geologicznej

2.3.1 Podłoże czwartorzędowe

Analizowany w pracy obszar znajduje się w obrębie niecki warszawskiej, będącej centralnym i najgłębszym fragmentem większej regionalnej jednostki tektonicznej – niecki brzeżnej zbudowanej z osadów permsko-mezozoicznych (Różycki 1972, Stupnicka 1997). Niecka brzeżna znajduje się w marginalnej (zachodniej) części prekambryjskiej platformy wschodnioeuropejskiej (Pożaryski, 1956), kontaktującej się z paleozoiczną platformą waryscyjską poprzez tzw. strefę T-T - Teissere’a-Tornquista (Stupnicka 1997). Niecka brzeżna, w tym warszawska, częściowo znajduje się w zasięgu występowania strefy T-T. Obecność strefy T-T wpływała na charakter sedimentacji permsko-mezozoicznej (zmiennosc litologiczną skał oraz ich miąższość), poprzez aktywnosc tektoniczną, w tym występowanie rozległych uskoków wzdłuż których, powierzchnia podłoża krystalicznego obniżała się ku zachodowi (Stupnicka 1997). Miąższość samych osadów kredowych w niecce warszawskiej może miejscowo osiągać nawet 1200 metrów, dominując pod względem miąższości osadów



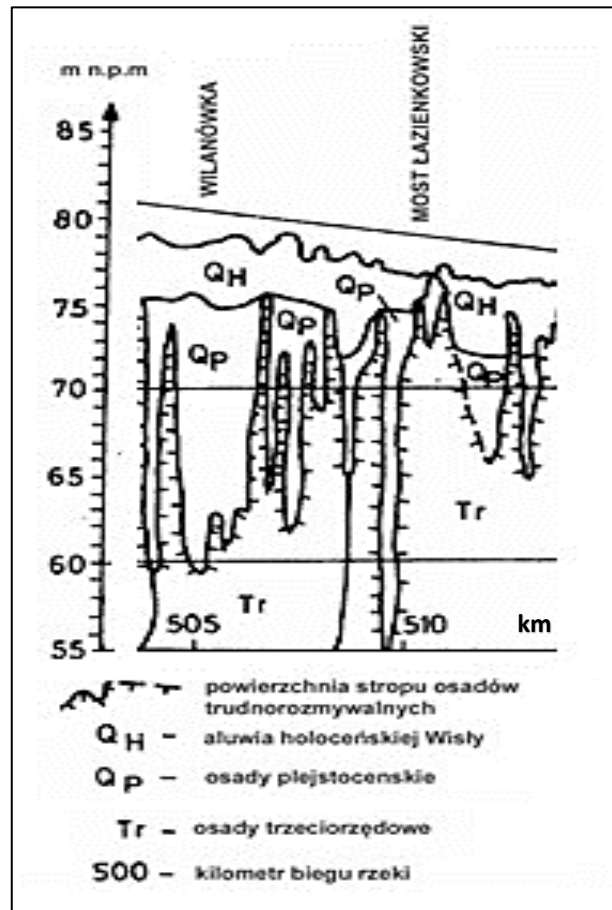
Rys. 4 Wycinek szkicu ukształtowania podłoża czwartorzędowego (SMGP 524) z widocznym zagłębieniem przebiegającym przez zaznaczony fragment koryta Wisły (Sarnacka 1980)

mezozoicznych względem innych rejonów niecki brzeźnej. Wraz ze zwiększoną miąższością, na obszarze niecki warszawskiej zaobserwowano najbardziej kompletny profil osadów permsko-mezozoicznych w całej niecce brzeźnej (Stupnicka 1997).

Na obszarze objętym arkuszem Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski – Warszawa Wschód nr 524 (Sarnacka 1980) na którym znajduje się opisywany w pracy obszar, najgłębsze wiercenia sięgnęły osadów górnej kredy. Są to jasnoszare, piaszczyste margle i ropy margliste, nie przewiercone do spągu. Strop utworów górnej kredy na tym obszarze występuje na wysokości 134-169,2 m p.p.m.; najwyżej w okolicach ulicy Żąbkowskiej na Pradze. Osady paleogenu reprezentowane są przez

oligocenyjskie ropy, mułki, piaski i żwiry wraz z konglomeratami fosforytowymi i charakterystyczną domieszką zielonego glaukonitu. Ich warstwa o miąższości od 24 do 86 metrów pokrywa górnokredowe dno niecki warszawskiej. Strop utworów oligocenyjskich w Warszawie występuje na wysokościach od 69,3 do 134,7 m p.p.m. Na osadach oligocenyjskich w obrębie całego arkusza Warszawa-Wschód, występują skały miocenyjskie (neogen) w postaci piasków, ropy i mułków z węglem brunatnym. Najpłycej zostały one nawiercone w okolicach Olszynki Grochowskiej (18,3 m p.p.m.), zaś najgłębiej w Wilanowie (88,5 m p.p.t.). Miąższość utworów miocenyjskich w Warszawie wynosi od 16,4 do 67,3 m (Sarnacka 1990).

Skały pliocenyjskie, na omawianym obszarze reprezentowane są głównie przez związane ropy, mułki ilaste (ropy pstre) i rzadziej piaski drobne i pylaste. Utwory te leżą na osadach miocenyjskich i stanowiąc podłoże dla osadów czwartorzędowych. Strop osadów pliocenyjskich w Warszawie jest silnie zaburzony glacytektonicznie. W strefie skarpy utwory neogenu i plejstocenu tworzą fałdy glacytektoniczne, które zanikają w kierunku na zachód (Różycki, Sujkowski 1936, Sarnacka 1990, Wysocki 1999, Watycha 1975, Bajda, Falkowski 2014).



Rys. 5 Fragment schematycznego, podłużnego przekroju geologicznego strefy korytowej Wisły w okolicach Warszawy (Falkowski 1990)

Osady plioceńskie występują lokalnie, bezpośrednio na powierzchni terenu. Wschodnie pliocenu znajdują się, głównie w rejonie krawędzi wysoczyzny (równiny warszawskiej) oraz w dolinie Wisły. Miąższość osadów plioceńskich ze względu na ich plastyczność i podatność na odkształcenia jest różna, wynosząc od 21,2 m w północno-wschodniej części Warszawy do nawet 162,9 m w okolicach Śródmieścia, gdzie występują największe wypiętrzenia. Sedymentacyjna miąższość utworów plioceńskich wynosi najprawdopodobniej od 90 do 140 m i zmienia się w zależności od ukształtowania powierzchni podłoża neogenu (*Rys. 4*).

Na obszarze Warszawy występuje kilka rozległych stref zwiększonej miąższości (do ok 100 m) osadów plioceńskich. Jedno z nich ma kształt wypełnionej rynny przebiegającej południkowo przez Pragę, Kamionek, Saską Kępę, Siekierki, Wilanów. Strefa ta ciągnie się aż do Latoszek (Powsin) (Sarnacka Z., 1980), prostopadle przecinając analizowany w niniejszej pracy odcinek koryta Wisły w okolicach ujęcia głównego – Grubej Kałki (*Rys. 4 i 5*).

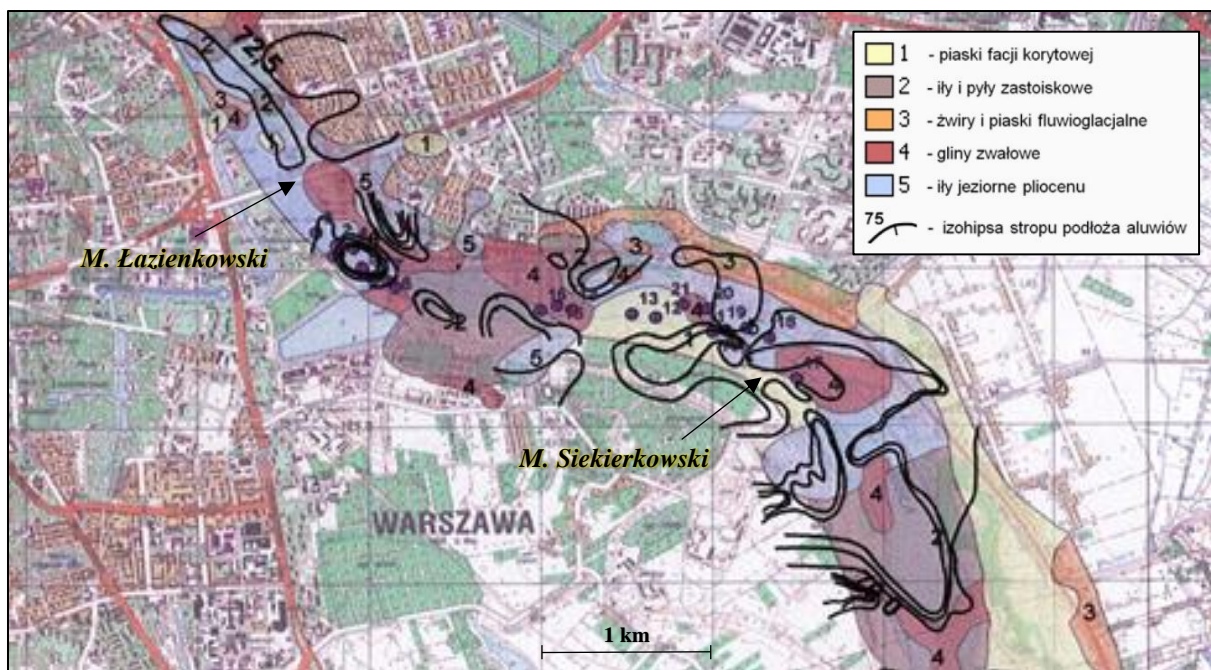
2.3.2 Utwory czwartorzędowe

Osady czwartorzędowe pokrywają cały obszar omawianego terenu. Miąższość utworów czwartorzędowych warunkowane jest ukształtowaniem powierzchni stropowej ich bezpośredniego podłoża (najczęściej pliocenu). Największe miąższości tych osadów znajdują się w głębokich rynnach (glacitektonicznych). Jedna z nich, przebiega od Wilanowa po Kamionek oraz przecina analizowany odcinek koryta Wisły w pobliżu Ujęcia Zasadniczego. Największa miąższość osadów czwartorzędu wynosi 109,4 m i została stwierdzona w Nadwilanówce (część dzielnicy Wilanów). Najmniejsze miąższości osadów Q (od 0,5 do 5 m) występują w miejscach wypiętrzeń utworów pliocenu. Na wysoczyźnie przeważają miąższości od 10 do 20 m (Sarnacka 1992). Zazwyczaj mniejsze miąższości występują w dolinie Wisły.

Na powierzchni utworów plioceńskich leżą osady zaliczane przez Różyckiego (1972) do preglacjału. Wykształcone są one jako piaski, żwiry i mułki kwarcowe, zawierające kaolinit oraz okruchy skał krzemionkowych (lidyty), pochodzące w wału metakarpackiego. Ponad nimi leży seria osadów plejstocenijskich reprezentujących pięć zlodowaceń (gliny zwałowe, osady wodnolodowcowe) i rozdzielonych je interglacjałami (piaski rzeczne, jeziorne utwory organiczne) (Sarnacka 1992).

2.3.3 Budowa geologiczna strefy korytowej doliny Wisły

Warszawski odcinek strefy korytowej uznawany jest za wyjątkowy, ze względu na obecność długiej na ponad 20 km kulminacji utworów trudno rozmywalnych, stanowiących podłoże dla jej plejstocenijskich i holoceńskich aluwiiów (Falkowski 1990, Falkowski 2006). Na



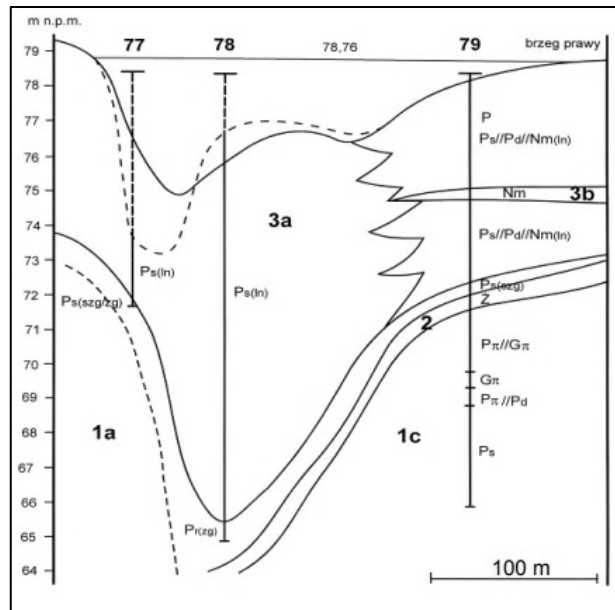
Rys. 6 Fragment mapy geologicznej powierzchni podłoża holoceńskich aluwii Wisły warszawskiej wraz z jej izoliniami (Falkowski i in. 1992)

odcinku Warszawskim koryta Wisły miąższość współczesnych piasków korytowych wynosi od 0 m w rejonie występowania wypiętrzeń utworów trudno rozmywalnych, do ponad 20 metrów w strefach depresji ich powierzchni (Falkowski 1990, Falkowski 1999, Kuźniar 2000). Przykryte aluwiami wypiętrzenia podłoża zbudowane są z utworów praktycznie nierozmywalnych (por. Hjulström 1935) (Rys. 5 i 6). Są wśród nich utwory spójne takie jak lodowcowe ły i gliny oraz plioceńskie ły jeziorne, a także utwory niespójne – gruboziarniste i silnie zagęszczone utwory rzeczne (głównie wodnolodowcowe). Utwory te przykryte są przeważnie warstwą rezydualnego bruku, którego miąższość nie przekracza zazwyczaj jednego metra (Falkowski 2006).

Powierzchnia stropu trudno rozmywalnego podłoża współczesnych aluwii korytowych stanowi naturalną bazę erozyjną dla odcinka koryta znajdującego się powyżej odcinka miejskiego (Falkowski i in. 2017).

W powierzchni podłoża aluwii w obrębie strefy korytovej Wisły, na odcinku warszawskim można wyróżnić cztery typy rzeźby (Falkowski 2006). Są to: I. strefy progów, w których miąższość aluwii korytowych jest najmniejsza, II. miejsca o największej miąższości aluwii korytowych nazywane w literaturze hydrotechnicznej (Kuźniar 2000) wybojami, III. strefy wypłaszczeń oraz IV. rynny, usytuowane często ukośnie względem przebiegu współczesnego koryta rzeki. (Falkowski 2006). Zarówno przebieg warstw utworów budujących bezpośrednio podłożę współczesnych aluwii (Różycki, Sujkowski 1936, Różycki

1968, 1971, Watycha 1973, Falkowski 1990, Wysokiński i in. 1999, Falkowski 2006, Falkowski i in. 2017, Bajda Falkowski 2014), jak też mozaika wychodni w ich powierzchni stropowej świadczą o ich silnym, glacitektonicznym zaburzeniu (Brykczyńska Brykczyński 1974). Falkowski i Laskowski (1978) sugerują możliwość współczesnego wypiętrzania się podłoża aluwiiów na odcinku miejskim koryta Wisły pod wpływem nacisku ciężaru osadów budujących wysoczyznę i starsze, aluwialne poziomy akumulacyjne.



Rys. 7 Przekrój geologiczny, poprzeczny przez Wisłę, powyżej ujęcia głównego – Grubej Kaśki (Falkowski, Ostrowski 2009)

Powyżej stabilizujących progów zbudowanych z utworów trudno rozmywalnych następuje intensywna sedimentacja aluwiiów (Falkowski i in. 2017). Poniżej kulminacji powierzchni stropu gruntów praktycznie nierozmywalnych, w miejscach, gdzie ich powierzchnia obniża się możliwe jest w czasie wezbrań powstawanie wybojów. W początkowym etapie wezbrania dochodzić może do usuwania w tych miejscach współczesnych aluwiiów korytowych. Po przejściu fali wezbraniowej wyboje takie wypełniane są osadem korytowym, którego miąższości są w takich strefach największe (Falkowski 2006).

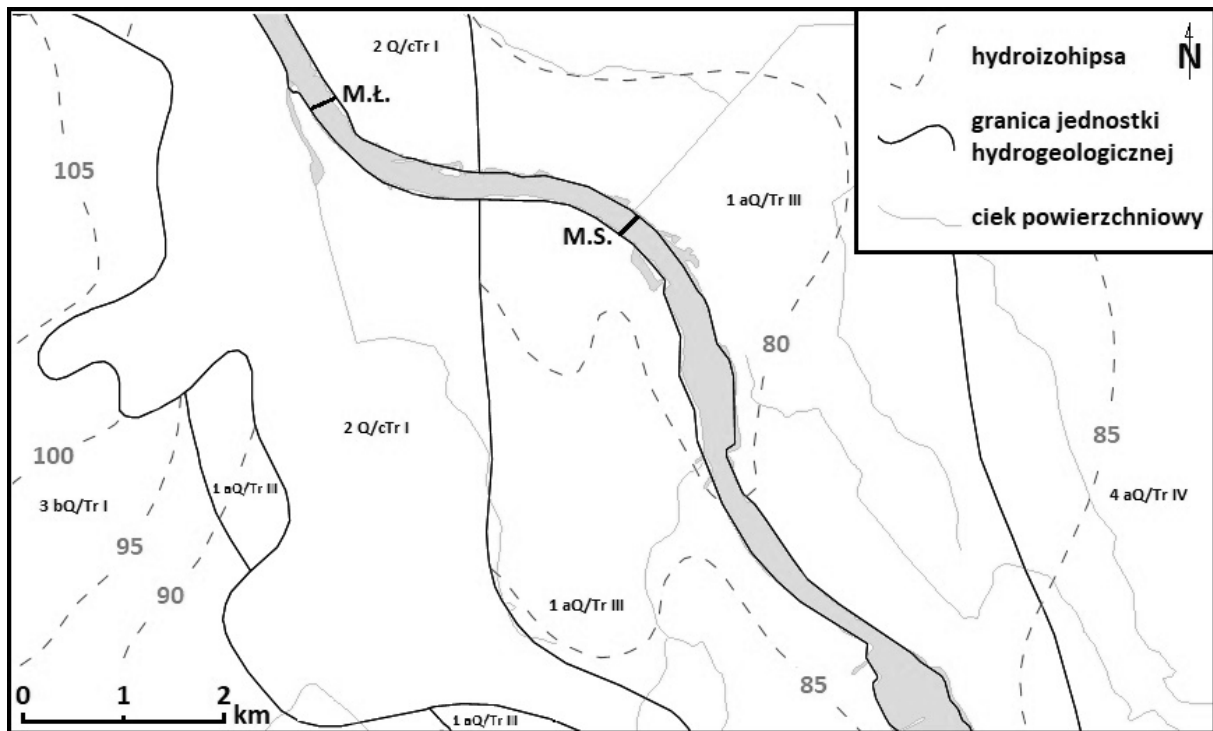
Badany odcinek koryta Wisły między 507, a 511 jego kilometrem cechuje się zróżnicowaną rzeźbą i budową geologiczną. Utwory trudno rozmywalne budujące podłoże aluwiiów na tym odcinku to łył jeziorne pliocenu, gliny zwałowe, łył i pyły zastoiskowe, a także gruboziarniste, silnie zagęszczone utwory rzeczne (fluwiogłacjalne i być może także interglacjalne; Sarnacka 1990), (Rys. 6). Lokalnie, na przykład w rejonie kilometra 509 w podłożu aluwiiów stwierdzano także obecność utworów sapropelowych (Falkowski i in. 2022). W okolicach 507,5 km przed mostem Siekierkowskim w części centralnej stwierdzono kulminację podłoża zbudowana z glin zwałowych, o rzędnych 71,0 m n.p.m. W części prawej koryta, w pobliżu ujęć infiltracyjnych (UU-1 i UU-2) występuje obniżenie w kształcie rynny o rzędnych poniżej 68 m n.p.m. zbudowane z łyłu pliocenijskiego. Wychodnia stropu łyłów pliocenijskich kontynuuje się, aż do 508,6 km głównie po prawej stronie koryta, zaś w części centralnej w podłożu aluwiiów występuje niewielki płat gliny zwałowej pokrytej brukiem kamienistym o rzędnych stropu nieprzekraczających 74 m n.p.m. W części centralnej badanego

fragmentu (508,6 – 509,6 km) w podłożu aluwiów występują utwory zastoiskowe - pyły, gliny pylaste oraz gliny zwałowe. Budują one powierzchnię o deniwelacjach nieprzekraczających 2 m. Strop tej powierzchni posiada rzędne od 71,0 do 73,0 m n.p.m. Od 509,6 km, czyli początku zwięzienia koryta („gorsetu warszawskiego”) podłoże holocenijskich utworów rzecznych stanowią głównie ły plioceńskie. Maksymalne rzędne ich powierzchni stropowej w tym miejscu nie przekraczają 75 m n.p.m., zaś najmniejsze jej wartości odnotowano przy lewym brzegu koryta w rejonie śluzy ujęcia wody przy ul. Czerniakowskiej. W miejscu tym znajduje się głęboka depresja/wybój (Rys. 7) sięgając nawet poniżej 43 m n.p.m. (Falkowski T., 2006). Miąższość aluwiów w strefie korytowej na analizowanym odcinku Wisły jest zróżnicowana, wynosząc od 0 m (w miejscach odsłonięcia utworów trudno rozmywalnych) do ponad 30 m w wybojach. Utwory aluwialne współczesnej Wisły cechują się zazwyczaj słabym zagęszczeniem ($ID < 0,33$), lokalnie średnim. Niespoiste utwory plejstocenijskie w podłożu aluwiów są zawsze silnie zagęszczone (Falkowski E. i inni 1993).

2.4 Badany odcinek koryta na tle regionalizacji hydrogeologicznej

Na obszarze całej Warszawy wydziela się dwa piętra wodonośne, będące źródłem zaopatrzenia w wodę stolicy - piętro trzeciorzędowe i piętro czwartorzędowe (Paczyński, Sadurski 2007). Według regionalizacji słodkich wód podziemnych B. Paczyńskiego (2007) omawiany obszar leży w obrębie makroregionu północno-wschodniego, regionu mazowieckiego, subregionu centralnego w obrębie rejonu Kotliny Warszawskiej. Opisany obszar znajduje się także w granicach dwóch zbiorników wód podziemnych o charakterze porowym, zaliczanych wg Kleczkowskiego (1990) do głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP): Doliny Środkowej Wisły (222) będącej jednocześnie pierwszym użytkowym poziomem wodonośnym oraz części centralnej Subniecki Warszawskiej (215A). Zbiornik Doliny Środkowej Wisły budują utwory czwartorzędowe, zaś głębiej położoną Subniecką Warszawską tworzą osady trzeciorzędowe (oligocenu i miocenu). Według podziału na Jednolite Części Wód Podziemnych (JCWPd) (Paczyński, Sadurski 2007), opisany fragment koryta Wisły znajduje się na granicy dwóch wydziałów: JCWPd nr 65 położonego po lewej stronie koryta Wisły i JCWPd nr 66 znajdującego się po jego prawej stronie.

W skład czwartorzędowego piętra wodonośnego wchodzi osady rzeczne związane z działalnością wód roztopowych lądolodów plejstocenijskich, a także rzeczne osady interglacjalne i współczesne aluwia korytowe Wisły i jej dopływów (Cyganski, Woźniak 1997). Kształt struktury, a szczególnie sumaryczna miąższość budujących ją osadów zależna jest od



Rys. 8 Mapa hydroizohips z zaznaczonym zasięgiem jednostek hydrogeologicznych okolic obszaru badań (Cygański, Woźniak 1997, zmieniona), M.Ł – Most Łazienkowski, M.S. – Most Siekierkowski

ukształtowania powierzchni stropowej utworów pliocenu (Sarnacka 1990). Fakt ten dowodzi znaczenia procesów glaciektonicznych w kształtowaniu tej struktury wodonośnej.

Według aktualnego stanu rozpoznania (Cygański, Woźniak 1997) w obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego rejonu Warszawy występują maksymalnie trzy poziomy wodonośne znajdujące się we wzajemnym kontakcie hydraulicznym. Po zachodniej stronie doliny Wisły od krawędzi wysoczyzny (Równiny Warszawskiej) swobodne zwierciadło użytkowego poziomu znajdują się na głębokości ok. 5 m poniżej powierzchni terenu, obniżając się w kierunku koryta Wisły. W tej strefie miąższość osadów wodonośnych nie przekracza 20 m. Strukturę tę tworzą: zwężająca się w kierunku centrum miasta („gorsetu warszawskiego”) listwa tarasu nadzalewowego (praskiego) wraz z płatami utworów zboczowych, a także aluwia korytowe holocenijskiej Wisły. Po prawej stronie koryta Wisły miąższości czwartorzędowych utworów wodonośnych są większe i wynoszą średnio ok. 40 m (Cygański, Woźniak 1997). Wraz ze zwiększeniem miąższości poziomu użytkowego zwiększa się wydajności studni wierconych (osiąga wartości w zakresie 70-120 m³/h). W sąsiedztwie koryta Wisły wydajności są mniejsze i bardziej zróżnicowane. Ich wartości mieszczą się w przedziale 10-70 m³/h (Cygański, Woźniak 1997).

Jakość wód podziemnych piętra czwartorzędowego w dolinie Wisły jest bardzo zróżnicowana. Złą jakością cechują się m.in. wody występujące w szerokim pasie równi zalewowej od okolic Siekierok, przez Pragę, aż po Targówek (Cygański, Woźniak 1997). Wody

o dobrej jakości rozpoznano między innymi w obrębie tarasu nadzalewowego wyższego (falenickiego; Różycki 1971) w okolicach Wawra (Cygański, Woźniak 1997).

W obrębie wysoczyzny (Równiny Warszawskiej) występują dwa związane hydraulicznie poziomy wodonośne prowadzące wodę pod niewielkim ciśnieniem hydrostatycznym (Cygański, Woźniak 1997). Czwartorzędowe utwory wodonośne na wysoczyźnie występują przeciętnie na głębokości kilkunastu metrów i posiadając średnią miąższość ok. 10 - 20 m. Wydajności studni mieści się w zakresie 30-50 m³/h. Miąższości warstw i wydatki studni, a także głębokość położenia stropu utworów czwartorzędowych maleją w strefach płytko położonego pliocenu. Wody podziemne na wysoczyźnie cechują się lepszą (dobra i średnią) jakością niż wody gruntowe występujące w dolinie Wisły (Cygański, Woźniak 1997). W miejscach płytkiego występowania utworów plioceńskich utwory wodonośne piętra czwartorzędowego zanikają lub charakteryzują się bardzo małymi miąższościami (Cygański, Woźniak 1997).

Wody podziemne piętra czwartorzędowego są intensywnie eksploatowane na obszarze aglomeracji warszawskiej, zarówno na obszarze doliny jak i wysoczyzny. Ich eksploatacja lokalnie powoduje powstawanie zauważalnej depresji. (Cygański K., Woźniak E., 1997).

Piętro trzeciorzędowe występujące na obszarze Warszawy zbudowane jest z dwóch poziomów wodonośnych, miocenińskiego i oligocenińskiego. Poziom mioceniński budują głównie piaski o miąższościach nieprzekraczającej 20 m. Ze względu na obecność w tych osadach wkładek i przelawień węgla brunatnego, który wpływa niekorzystnie na barwę i zapach eksploatowanej wody, struktura ta nie ma znaczenia użytkowego (Cygański, Woźniak 1997).

Woda z poziomu oligocenińskiego charakteryzuje się znacznie lepszą jakością i docenianymi powszechnie walorami smakowymi (Bażyński 1996). Miąższość osadów oligocenu – piasków glaukonitowych, wynosi od kilkunastu do ponad 60 metrów. Wydajności potencjalnej studni oligocenińskich mieszczą się w zakresie 50-70 m³/h (Cygański, Woźniak 1997). Zwierciadło naporowe wód oligocenińskich występujących na głębokości ponad 150 m pod powierzchnią terenu stabilizuje się na wysokości około 70 m n.p.m. (Cygański, Woźniak 1997). Lej depresji poziomu trzeciorzędowego został zauważony po intensywnej jego eksploatacji. Po ograniczeniu ujmowania wód oligocenińskich w celach konsumpcyjnych stwierdzono zmniejszenie powierzchni i głębokości zasięgu depresji (Cygański K., Woźniak E., 1997).

Budowa i położenie omawianych poziomów wodonośnych zostały przedstawione na przekroju hydrogeologicznym (Zał. 1).

Według arkusza Warszawa Wchód (524) Mapy Hydrogeologicznej Polski w skali 1:50000, (Cyganski, Woźniak (1997) badany obszar znajduje się w obrębie dwóch jednostek. Pierwsza z nich to struktura czwartorzędowa (1aQ/TrIII) o przebiegu południkowym, zajmująca wschodnią część analizowanego fragmentu koryta wraz z tarasami Wisły. Zachodnia część koryta znajduje się w obrębie jednostki 2Q/cTrI (Rys. 8).

W obrębie struktury czwartorzędowej (1aQ/TrIII) zwierciadło swobodne stwierdza się przeciętnie na głębokościach około 5 metrów ppt. Miąższości tego poziomu wynoszą średnio ok. 20 m. Brak utworów izolujących ponad strukturą wpływa na wysoką odnawialności jej zasobów. Moduł zasobów odnawialnych określono na poziomie $260 \text{ m}^3/24\text{h}/\text{km}^2$, zaś moduł zasobów dyspozycyjny na $234 \text{ m}^3/24\text{h}/\text{km}^2$.

Miąższość utworów wodonośnych oligocenu - piasków z glaukonitem, budujących drugą, trzeciorzędową strukturę (2Q/cTrI) wynosi ok. 37 m. Strop tych osadów leży przeciętnie na głębokości około 150 m. Poziom jest izolowany od góry warstwą utworów plioceńskich o miąższości od 60 do 140 m (Sarnacka 1980, 1992, Bażyński 1996). Moduł zasobów dyspozycyjnych i odnawialnych tej struktury został określony na poziomie $20 \text{ m}^3/24\text{h}/\text{km}^2$ (Cyganski, Woźniak 1997).

2.5 Charakterystyka wód powierzchniowych

2.5.1 Cieki i zbiorniki wodne

Sieć hydrograficzna przyległego do doliny Wisły obszaru centralnej Warszawy obejmuje (poza korytem Wisły) także mniejsze cieki, sztuczne kanały oraz zbiorniki wodne (jeziora) będące pozostałościami rynien erozji wezbraniowej (Falkowski, Ostrowski 2015, Sikorska 2014), a także sztuczne zbiorniki wodne. Głównym dopływem Wisły na tym obszarze, jest rzeka Wilanówka (Rys. 9). Położenie jej ujścia zmieniało się w czasach historycznych. W latach dwudziestych ubiegłego wieku znajdowało się poniżej przekroju obecnego mostu Siekierkowskiego. Aktualnie Wilanówka wpada do Wisły na wysokości elektrociepłowni Siekierki (504+900 km Wisły). Znajdujący się między Wilanówką, a korytem Wisły fragment równi zalewowej nazywany był Łachą Siekierkowską. Największym naturalnym zbiornikiem wodnym na terenie miasta jest jezioro Czerniakowskie. Leży ono w obrębie rynny erozji wezbraniowej (Falkowski 2006). W północnej jej części znajdowało się jeszcze jedno, mniejsze jezioro. Jego pozostałością jest basen Portu Czerniakowskiego. Morfologia tej strefy została silnie przeobrażona w efekcie rozbudowy ujęcia wody przy ulicy Czerniakowskiej oraz budowy Trasy Łazienkowskiej.

Jeziora – relikty przepływów wezbraniowych znajdują się także na prawym brzegu. Są to jeziora: Gocławskie, Balaton i największe jezioro Kamionkowskie. Rynna erozji wezbraniowej w której się znajdują biegnie po powierzchni równi zalewowej pod skarpą tarasu nadzalewowego praskiego (Falkowski 2006). Jej ujście znajduje się w rejonie Portu Praskiego (Falkowski, Ostrowski 2015).



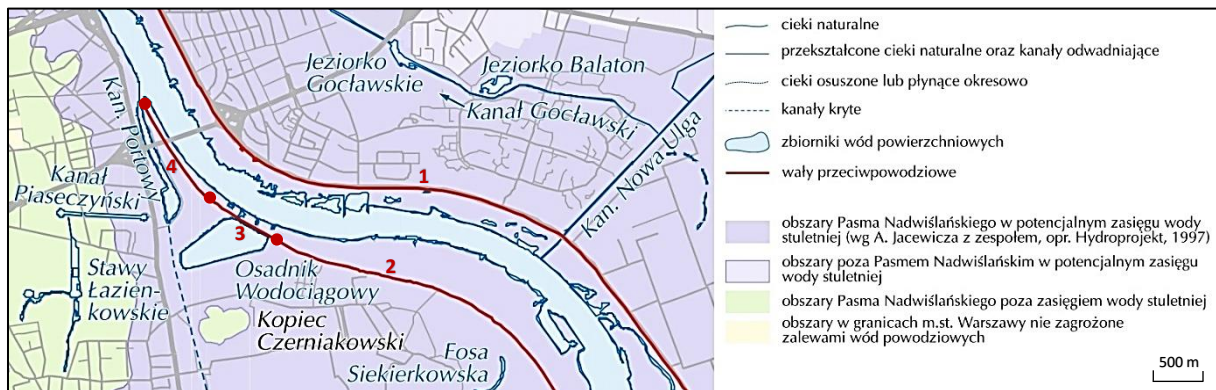
Rys. 9 Wycinek mapy topograficznej okolic Warszawy WIG 1924 r. z widocznym przebiegiem ówczesnej Wilanówki (staremapy.waw.pl)

Największym sztucznym zbiornikiem wodnym jest staw - dawny osadnik Czerniakowski będącego częścią systemu poboru wody dla Warszawy zaprojektowanego przez Williama Lindleya we wczesnych latach dwudziestych XX wieku (Rabczewski, Rutkowski 1937).

Poza wymienionymi wodami powierzchniowymi w skarpie warszawskiej występują podboczowe źródła związane z wychodniami w skarpie utworów fluwioglacjalnych. Wypływ wód w tych strefach zanika (Macioszczyk, Grochowski, Porębska 1991, Dziedziczak 2006) co wiązać można z postępującą urbanizacją oraz zmianami w zagospodarowaniu przestrzennym miasta (Pasieczna i in., 2005).

W skład sieci hydrograficznej Warszawy wchodzi także sztuczne kanały: Bródnowski, Żerański, Wystawowy, Grochowski oraz kanał Nowa Ulga. Ostatni z nich łączy się z korytem Wisły w obrębie badanego odcinka koryta poniżej mostu Siekierkowskiego (Rys. 10).

Wzdłuż koryta, po obu jego stronach na powierzchni tarasu zalewowej (równi zalewowej) znajdują się wały przeciwpowodziowe. Budowla znajdująca się na prawo od koryta



Rys. 10 Fragment mapy hydrograficznej Warszawy (Pietrusiewicz i in., 2000), 1 – wał Miedzeszyński, 2 – wał Siekierkowski, 3 – wał Czerniakowski, 4 – wał Śródmiejski

biegnie równolegle do ulicy Wał Miedzeszyński i podobnie jak ona jest nazywany. Wał znajdujący się na lewo od koryta podzielony jest na badanym fragmencie doliny na trzy części. Posuwając się w dół biegu od mostu Siekierkowskiego są to: Wał Siekierkowski, Wał Czerniakowski (biegnie wzdłuż działki Stacji Pomp Rzecznych MPWiK) oraz na wysokości portu Czerniakowskiego Wał Śródmiejski (Rys. 10).

2.5.2 Warszawski odcinek koryta Wisły

Określenie Wisła warszawska jest terminem bardziej umownym niż hydrograficznym. Obejmuje ono 28 kilometrowy odcinek koryta od kilometra 498 do kilometra 526. Badany odcinek warszawskiej Wisły mieszczący się między 507 a 511 km Wisły jest znacząco przekształcony przez człowieka.

Do lat osiemdziesiątych XIX wieku roztokowe koryto warszawskiego odcinka Wisły podlegało ciągłym zmianom, szczególnie podczas wezbrań. W roku 1885 według projektu inż. Jakuba Kosteckiego rozpoczęto prace regulacyjne. Ich celem była poprawa warunków żeglugi oraz stworzenie dogodnych warunków dla eksploatacji wody z koryta. Koryto uległo zwężeniu i pogłębieniu. Wybudowano także w pobliżu obecnego Osadnika Czerniakowskiego ujęcie powierzchniowe tzw. smok wodociągu Lindleya:

„Wtedy na skutek poruszonej przez miasto sprawy, postanowiono uregulować brzegi Wisły, co obecnie tylko do pewnego stopnia zabezpiecza normalny bieg rzeki. Nurt jej pomimo tam regulacyjnych wykręca się wężowato, przez co w korycie rzeki tworzą się mielizny, przenoszące się z jednego miejsca na drugie w dół rzeki, składając piasek nawet przy wklęsłym lewym brzegu, gdzie właśnie ułożone są smoki” (Lindley, Grotowski, 1911).

Prace regulacyjne polegały na wybudowaniu poprzecznych tam faszynowo-kamiennych po prawej stronie koryta rzeki. Pozwoliły one na odsunięcie nurtu od prawego jej brzegu ku



Rys. 11 Porównanie położenia brzegów Wisły w 1934 ze stanem obecnym (przebieg brzegów Wisły: mapa.um.warszawa.pl, podkład fotograficzny: ukosne.um.warszawa.pl)

lewemu. (Biernacki Z., 2000). W roku 1968 rozpoczęto budowę po obu stronach koryta poprzecznych żelbetowych ostróg regulacyjnych zakończonych głowicą z narzutu kamiennego. W efekcie tych prac na obszarze Warszawy koryto Wisły zostało zwężone i wyprostowane (Arkuszewski, 1985). Szerokość trasy regulacyjnej zmniejszyła się z 340 m do 220 (Jacewicz, Kuźniar 2000). Regulacja koryta spowodowała zwiększenie prędkości przepływu (Gutry-Korycka i in. 2006) i ukształtowanie się tranzytowego charakteru koryta (Popek i inni 2009). Obecnie na analizowanym w pracy fragmencie koryta Wisły nie ma większych odsypów korytowych i wysp, które powstałyby bez oddziaływania budowli hydrotechnicznych (ostróg czy filarów przepraw mostowych). Formy takie występują powyżej 507 km rzeki.

Rumowisko rzeczne osadziło się także w przestrzeniach międzyostrogowych. Szerokość koryta Wisły na opisywanym w pracy odcinku w efekcie prac regulacyjnych zmniejszyła się w niektórych miejscach nawet o połowę, względem położenia brzegów z lat 30 minionego wieku (Rys. 11).

2.6 Charakterystyka wybranych elementów meteorologicznych oraz reżim hydrologiczny analizowanego odcinka Wisły

Cały obszar dorzecza Wisły, w tym także Warszawa znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego o typie przejściowym między morskim i lądowym (Woś 1999). Na obszarze tym masy powietrza kontynentalnego, euroazjatyckiego stykają się z wilgotnym powietrzem znad Atlantyku. Bezpośrednim efektem takiego położenia są znaczące wahania wartości podstawowych parametrów meteorologicznych na przestrzeni wielolecia (KZGW, 2023).

Według regionalizacji klimatycznej A. Wosia (1999) opartej na częstości występowania charakterystycznych typów pogody na danym obszarze w latach 1951-1980, badany fragment koryta znajduje w obrębie Regionu Środkowomazowieckiego. Zalicza się do niego środkową część Niziny Mazowieckiej oraz cały obszar Kotliny Warszawskiej. Region Mazowiecki posiada największą na Niżu Polskim liczbę dni umiarkowanych ciepłych (średnia temperatura dobową: 5,1-15,1°C) i pochmurnych (ok. 62 dni). Licznie występują tu też dni bardzo ciepłe (śr. temp. dobową >15,1°C) bez opadu. Rzadziej niż w innych regionach klimatycznych Polski występują tu dni z pogodą przymrozkową, umiarkowanie zimną (śr. temp. dobową: >5,0°C), pochmurną (ok. 12 dni) oraz dni z pogodą przymrozkową - bardzo chłodną (śr. temp. dobową: 0,1-5,0°C) trwającą ok. 38 dni.

Na obszarze Warszawy jak i w innych regionach Polski ostatnie trzydziestolecie referencyjne (1991-2020) cechowało się znaczącym wzrostem mierzonych temperatur powietrza względem lat wcześniejszych. W latach 1961-1990 średnia temperatura roczna nie przekraczała 8°C, natomiast obecnie wynosi około 9°C (Tab. 1). Średnie temperatury sezonowe podobnie jak roczne podniosły się o około 1 stopień. W ostatnich latach obserwuje się pokaźny wzrost liczby dni upalnych oraz spadek liczby dni bardzo mroźnych wraz z dniami z pokrywą śnieżną. Średnia roczna suma opadów dla Warszawy w latach 1961-1990 wyniosła 515,9 mm, zaś w kolejnym okresie referencyjnym zaobserwowano wzrost wysokości opadów do 549,3 mm. (Tomczyk, Bednorz, 2022). W ostatnich pięciu latach (2018-2022), poza rokiem 2021, średnia temperatura roczna odnotowana na stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie wyniosła ponad 10°C, przekraczając normę z lat 1971-2000 (8,1°C) o ponad 2 stopnie (Tab. 2). Dla tej samej stacji w podanym zakresie czasowym roczna suma opadów była znacząco nieregularna. W latach 2018, 2019, 2022 roczna suma opadów nie przekroczyła 460 mm, będąc istotnie mniejsza od normy z lat 1971-1990 wynoszącej 520 mm, natomiast w latach 2020 i 2021 wartość to została wysoce przekroczona (na podstawie danych z roczników meteorologicznych IMiGW).

Suma rocznego parowania terenowego dla subregionu nizinnego odcinka środkowej Wisły w latach 1931-1960 mieściła się w zakresie około 400-450 mm (Stachy red., 1986) nie dominując nad opadami. W ostatnich latach suma rocznego parowania terenowego na obszarze Warszawy zazwyczaj przeważa nad roczną sumą opadów. W roku 2022 sumaryczny bilans wynosił około -200 mm skutkując suszą glebową (na podstawie danych IMiGW <https://imgw.pl/wydarzenia/charakterystyka-wybranych-elementow-klimatu-w-polsce-w-2022-roku-podsumowanie>).

Tab. 1 Statystyki klimatyczne dla stacji Warszawskiej z dwóch kolejnych trzydziestolec referencyjnych (Tomczyk A, Bednorz E., 2022)

Statystyka klimatyczna		Warszawa	
Średnia temperatura [°C]	rok	a	7,8
		b	9,0
	wiosna	a	7,7
		b	8,9
	lato	a	17,3
		b	18,8
	jesień	a	8,3
		b	8,8
	zima	a	-2,1
		b	-0,7
Liczba dni upalnych	a	3,8	
	b	9,0	
Liczba dni bardzo mroźnych	a	2,4	
	b	1,7	
Roczna suma opadów [mm]	a	515,9	
	b	549,3	
Liczba dni z pokrywą śnieżną	a	60,3	
	b	48,4	

a – 1961–1990, b – 1991–2020

W ciągu ostatnich 50 lat (Tab. 3), a w szczególności od roku 2014, zauważalny jest gwałtowny wzrost średnich temperatur rocznych powietrza (występowanie lat bardzo ciepłych, anomalnie ciepłych i ekstremalnie ciepłych) oraz zwiększenie częstotliwości odchodzenia od normy sum opadów z wielolecia, które skutkuje pojawianiem się po sobie lat suchych i wilgotnych. Istotny wzrost temperatury na obszarze aglomeracji warszawskiej prawdopodobnie należy wiązać ze zmianami klimatu oraz z rozwojem zasięgu występowania terenów zurbanizowanych skutkującym intensyfikacją efektu miejskiej wyspy ciepła (Błażejczyk i in. 2014). Zmiany wysokości odnotowywanych temperatur wynikające z wymienionych przyczyn wiążą się ze zmianą charakteru opadów oraz zwiększeniem procesu ewapotranspiracji szczególnie na terenach miejskich. W ostatnich latach na obszarze Warszawy obserwuje się też znaczący wzrost ekstremalnych zjawisk pogodowych, w tym m.in. upałów, gwałtownych burz oraz deszczów nawalnych, często skutkujących lokalnymi podtopieniami (na podstawie danych z roczników meteorologicznych IMiGW).

Tab. 3 Termiczna i opadowa klasyfikacja lat (1971-2022) dla stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie. (Roczniki meteorologiczne, IMiGW)

LATA	Temp.	Opady
1971		
1972		
1973		
1974		
1975		
1976		
1977		
1978		
1979		
1980		
1981		
1982		
1983		
1984		
1985		
1986		
1987		
1988		
1989		
1990		
1991		
1992		
1993		
1994		
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003		
2004		
2005		
2006		
2007		
2008		
2009		
2010		
2011		
2012		
2013		
2014		
2015		
2016		
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		
2022		

Klasy	Nr	Kolor	Ocena roku	Kwantyle średniej temperatury powietrza
1			ekstremalnie ciepły	> 0,95
2			anomalnie ciepły	0,90 - 0,95
3			bardzo ciepły	0,80 - 0,90
4			ciepły	0,70 - 0,80
5			lekkie ciepły	0,60 - 0,70
6			normalny	0,40 - 0,60
7			lekkie chłodny	0,30 - 0,40
8			chłodny	0,20 - 0,30
9			bardzo chłodny	0,10 - 0,20
10			anomalnie chłodny	0,05 - 0,10
11			ekstremalnie chłodny	< 0,05

Klasy	Nr	kolor	ocena roku	% normy opadowej
1			skrajnie suchy	< 50
2			bardzo suchy	50-74
3			suchy	75-89
4			normalny	90-110
5			wilgotny	111-125
6			bardzo wilgotny	126-150
7			skrajnie wilgotny	> 150



Fot. 1 Powódź w maju 2010 roku (1 - fot. M. Jankowski, 2 – fot. Ł. Trąbiński)

Według podziału hydrologicznego Polski omawiany fragment należy do regionu Środkowej Wisły i leży w obrębie jednostki hydrograficznej (nr 25) „Wisła od Wieprza do Narwi” (Piórkowski i in. 2013). Obszar ten cechuje się deszczowo-śnieżnym reżimem odpływu, który determinuje pojawianie się wezbrań wczesnowiosennych oraz niżówek w okresie jesiennym (Bogdanowicz i in., 2000). Niskie stany wód przypadają na tym odcinku najczęściej w okresie od września do grudnia (Fal, Dąbrowski, 2001), jednak początki niżówek w niektórych latach, szczególnie ostatnich, występowały także podczas lipca i sierpnia (Kaznowska i in. 2018).

Zazwyczaj w marcu i kwietniu na terenie wydzielonej jednostki dochodzi do wezbrań roztopowych, natomiast w miesiącach letnich (czerwiec, lipiec, sierpień) pojawiają się wezbrania opadowe. W ostatnich latach wezbrania roztopowe są mniej intensywne lub nie występują wcale ze względu na łagodne zimy. Przebieg stanów wody na odcinku warszawskim cechuje się dużą nieregularnością. Zarówno niżówki jak i wezbrania mogą występować tu w dowolnej porze roku. (Dębski, 1961). Najwyższe wezbranie ostatnich lat miało miejsce 22 maja w 2010 roku wówczas stan na wodowskazie Warszawa-Bulwary znacznie przekroczył stan alarmowy (650 cm) wynosząc 779 cm. Zwierciadło wody niemal osiągnęło wysokość korony wałów przeciwpowodziowych. Taka sytuacja miała miejsce w Warszawie m.in. przy osadniku Czerniakowskim (*Fot. 1*).

Głębokie niżówki na Wiśle obserwowane w ostatnich latach nie są zjawiskiem wyjątkowym i pomimo przekroczenia absolutnych minimalnych stanów wody dla wodowskazów warszawskich np. w sierpniu 2015, we wrześniu 2020, czy wrześniu 2024 wartości przepływu nie są rekordowo małe. Minimalne roczne przepływy dla Wisły odnotowane w okresie 1951-2019 nie wykazują trendu malejącego, a wręcz odwrotnie, nieznacznie wzrastają w przeciwieństwie do stanów minimalnych, które znacząco maleją (Kaznowska, Wasilewicz 2020). Obniżanie się stanów minimalnych jest charakterystyczne dla tego odcinka i obserwowane od lat czterdziestych, dwudziestego wieku (Zielińska 1960). Proces ten według Skibińskiego (1994) został uruchomiony przez eksploatację kruszywa na potrzeby budownictwa oraz prace regulacyjne w postaci m.in. zwężenia koryta (Kaznowska, Wasilewicz 2020). Według Kornackiego (1960), regulacja rzeki na odcinku warszawskim

Tab. 4 Średnie roczne temperatury i opady dla stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie (lata 2018-2022),
(Dane pomiarowo-obserwacyjne z roczników meteorologicznych IMiGW)

	Stacja meteorologiczna: Warszawa-Okęcie				
	2018	2019	2020	2021	2022
Średnia temperatura roczna [°C]	10,5	10,9	10,5	9,0	10,0
Roczna suma opadów [mm]	433,4	390,0	645,5	675,5	459,9

Tab. 5 Wartości przepływów charakterystycznych dla trzech wodowskazów zlokalizowanych najbliżej m.st. Warszawa (Żelazo i in., 2023)

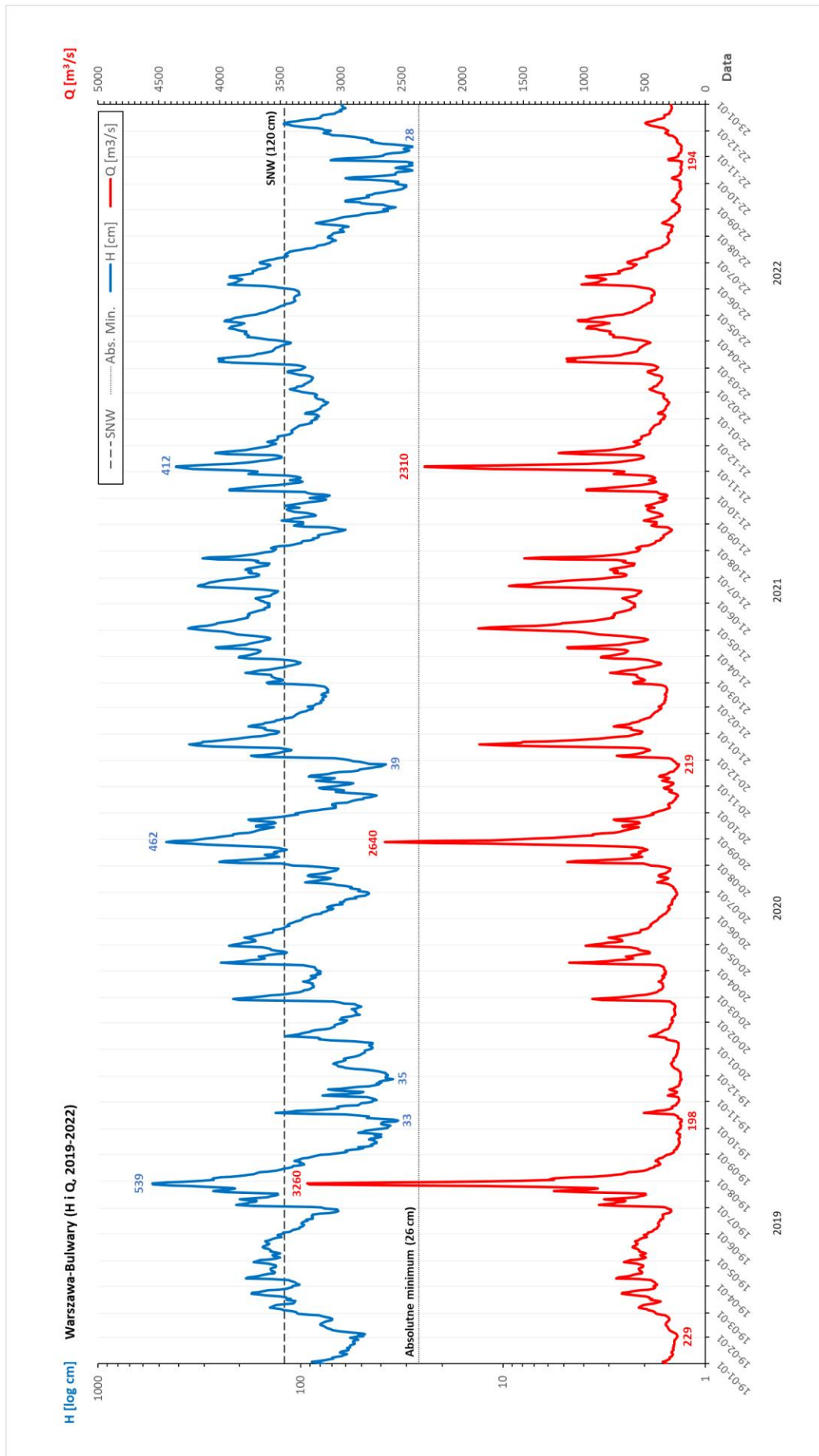
Water gauge	Period of observation	Km of river [km]	Area of catchment [km ²]	SWQ [m ³ /s]	SSQ [m ³ /s]	SNQ [m ³ /s]
Warszawa - Nadwilanówka	1951-1990	503,5	84539,5	2690	573	211
Warszawa	1921-2000	513,3	84557,2	2950	568	192
Modlin	1951-1980	551,5	160263,0	3640	911	305

została wykonana niewłaściwie ze względu na przyjętą szerokość rzeki (300 m) oraz w wyniku przyjętych zbyt dużych promieni łuków, czego skutkiem było gwałtowne obniżanie się dna, średnio ok. 9-10 cm rocznie. Ocenia się, iż obecnie średni poziom dna koryta na wysokości Portu Praskiego (513 km Wisły) obniżył się o ponad 2,2 m, względem pomiarów z roku 1919 (Żelaziński i in. 2005, Popek i in. 2009, Kowalski i in., 2018). Według Falkowskiego i Ostrowskiego (2009) zmiany poziomu dna polegają wyłącznie na zmianie miąższości warstwy współczesnych aluwii korytowych i nie dotyczą utworów trudno rozmywalnych, zabezpieczonych przed erozją warstwą bruku rezydualnego zbudowanego z głazów, otoczków. Miejsca występowania bruków na powierzchniach garbów podłoża - tzw. „raf” stanowią lokalne bazy erozyjne. Największym zagrożeniem dla stabilności położenia dna koryta Wisły jest niszczenie właśnie tej powierzchni. Jak wynika z danych Hydroprojektu (Falkowski 2006) w latach 1989-1991 z koryta Wisły w Warszawie, na odcinku km 508 – 518 wyeksploatowano łącznie 2595 m³ głazów tworzących stabilizujący erozję bruk rezydualny. Prace te spowodowały obniżenie się minimalnej powierzchni dna na całym miejskim odcinku koryta Wisły (Hydroprojekt 2000, za Falkowskim 2006).

Obniżanie poziomu dna, a zatem także minimalnych stanów może przyczyniać się do pojawiania się awarii ujęć wód powierzchniowych i infiltracyjnych, skutkując m.in. kolmatacją mechaniczną części urządzeń wykorzystywanych przy eksploatacji (np. drenów) lub zamuleniem (pogorszeniem jakości) ujmowanej wody, a nawet w sytuacjach ekstremalnych pobieraniem wody bezpośrednio z rzeki z pominięciem procesu wstępnego oczyszczenia poprzez przepływ przez warstwę aluwii korytowych (Falkowski 2001).

W pobliżu omawianego obszaru występują trzy wodowskazy: Warszawa-Bulwary, Nadwilanówka oraz wodowskaz przy Porcie Czerniakowskim. Dwa pierwsze, wymienione wodowskazy należą do państwowej sieci Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Najbliżej analizowanego w pracy odcinka koryta znajduje się wodowskaz Warszawa-Bulwary. Znajduje się w kilometrze 513+800 biegu, około 1,3 km w dół rzeki od mostu Łazienkowskiego. Bliskie położenie, a także kompletność danych odnotowywanych z tego



Rys. 12 Hydrogram stanów i przepływów dla wodowskazu Warszawa-Bulwary (lata hydrologiczne 2019-2022), (opracowanie na podstawie danych z IMiGW).

wodowskazu, zdecydowały o jego wybraniu do określania stanu wody dla wybranego odcinka Wisły, m.in. podczas badań terenowych. Zero wodowskazu Warszawa-Bulwary wynosi 76,076 m n.p.m.

Rysunek 12 przedstawia zmienność stanów i przepływów w czasie 4 lat hydrologicznych (2019-2022), w czasie których w ramach niniejszej pracy realizowane były badania batymetryczne. Przez 888 dni w ciągu ostatnich 4 lat (prawie 61% analizowanego czasu) utrzymywał się stan niższy lub równy 120 cm wodowskazu, odpowiadający SNW (średniej niskiej wodzie). Stan średni z wielolecia (235 cm) został przekroczony tylko podczas 76 dni na 1461 analizowanych (5%). Podczas 5 dni w minionym roku hydrologicznym (w miesiącach sierpień i wrzesień) zanotowano wyrównanie stanu wynoszące 26 cm, określające absolutne minimum z 29 sierpnia 2015 roku. Podczas tej ekstremalnej niżówki, pomimo wyrównania absolutnego minimum nie został przekroczony przepływ SNQ - średni z najniższych przepływów rocznych (*Rys. 12 i Tab. 4*). W zasięgu wspomnianego zakresu czasowego wezbrania wystąpiły głównie w miesiącach od maja do lipca. Największe z nich wystąpiło na przełomie maja i czerwca w 2019 roku, wtedy maksymalny odnotowany stan został określony na poziomie 539 cm, nie przekraczając stanu ostrzegawczego (600 cm). Podczas tego wezbrania również określono najwyższą wartość przepływu wynoszącą 3260 m³/s, zaś najniższą stwierdzono we wrześniu 2022 roku, podczas wspomnianej rekordowej niżówki (28 cm), na poziomie ok. 194 m³/s.

2.7 Jakość wody w Wiśle na odcinku warszawskim

Woda płynąca korytem Wisły od wielu lat uznawana jest pod względem jakości jako pozaklasowa, nie spełniająca wymagań wody przeznaczonej do celów komunalnych (Pacholec B., Zdanowicz 2008). Okresowo podczas wezbrań jakość wody w Wiśle może ulec jeszcze dalszemu pogorszeniu (Mossakowska, Pacholec, Nowak 2003).

Na poziom zanieczyszczenia wody w Wiśle ma wpływ wiele czynników. Pomimo funkcjonowania systemu odprowadzania i oczyszczania ścieków, do koryta trafiają pewne ilości ścieków przemysłowych i komunalnych pochodzące z obszaru miasta. Źródłem zanieczyszczeń są także położone w górę biegu ośrodki miejskie. Część zanieczyszczeń dociera do koryta Wisły wraz ze spływem powierzchniowym z obszarów południowej Polski użytkowanych rolniczo. Na jakość wody w Wiśle wpływa także sam rozwój Warszawy. Rozbudowa aglomeracji powoduje zmiany warunków infiltracji i spływu powierzchniowego (Pasiczna i in., 2005).

W ostatnich latach pomimo ciągłego pozaklasowego charakteru jakości wody w Wiśle w Warszawie, dostrzegalne są powolne pozytywne zmiany. Zahamowany został trend w stałym pogarszaniu się jakości wody. Stwierdza się m.in. malejący udział związków nieorganicznych w postaci siarczanów i chlorków oraz spadek stężeń substancji toksycznych: metali ciężkich, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i detergentów (Pasiczna i in., 2005). Prawdopodobnymi przyczynami poprawy jakości wody na odcinku Warszawskim w ostatnich latach może być m.in. redukcja liczby zakładów przemysłowych oraz częściowa likwidacja kopalń w dorzeczu Wisły (Piasieczna i in., 2005). Jakość wody w Wiśle poprawia się także pod względem zawartości substancji organicznych określanych jako TOC (całkowity węgiel organiczny) oraz utlenialność (Pacholec, Zdanowicz 2008).

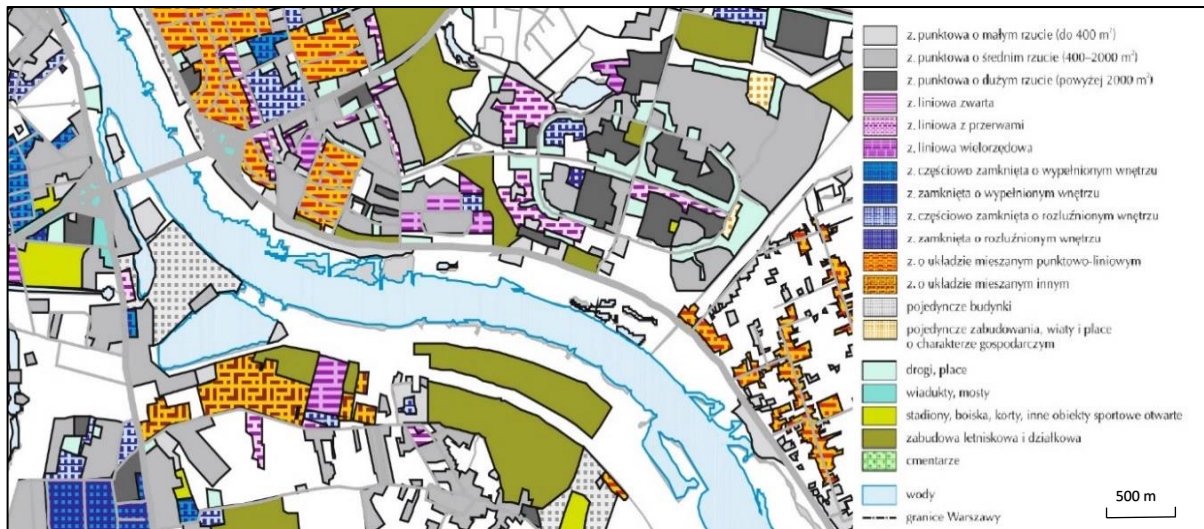
Na poprawę jakości wód powierzchniowych na obszarze Warszawy niewątpliwie wpływ miała rozbudowa i modernizacja oczyszczalni „Czajka” zakończona w roku 2012. Jej możliwości oczyszczania ścieków wzrosły z 240 tys. m³/24h do 435 tys. m³/24h. Podobny wpływ na jakość wody miał wzrost wydajności oczyszczalni „Południe” w Wilanowie, która osiągnęła zakładaną wydajność w roku 2006. Oczyszczalnia ta przejęła ścieki z południowej, lewobrzeżnej części Warszawy wcześniej zrzucane bezpośrednio do Wisły. Po 2012 roku w wyniku przeprowadzonych inwestycji do oczyszczalni „Czajki” mogły być skierowane ścieki z centralnej i północnej części lewobrzeżnej Warszawy, które we wcześniejszych latach również bezpośrednio trafiały do Wisły.

Na poprawę jakości wody płynącej korytem Wisły pewny wpływ miało także wydłużenie sieci kanalizacyjnej na obszarze stolicy z 2017 km w 2007 roku do 2859 km pod koniec roku 2019 (Program ochrony środowiska..., 2021).

2.8 Krajobraz i zagospodarowanie obszaru przyległego do koryta

Na podstawie oceny Lickiewicza i współpracowników (2000) wzdłuż analizowanego w pracy odcinka przeważają tereny zurbanizowane. Od północy (prawy brzeg, rejon Goławia i Saskiej Kępy) mają one charakter zabudowy punktowej i punktowo liniowej. Po lewej stronie rzeki poza wałami przeciwpowodziowymi dominuje zabudowa typu mieszanego z przewagą punktowej. W pobliżu mostu Siekierkowskiego na obszarze przyległym do koryta znajdują się działki pracownicze i letniskowe (Rys. 13).

Bezpośrednio przy korycie rzeki znajdują się tereny zielone – łągi, nazywane także łągami nadwiślańskimi. Wśród gatunków tu występujących największe znaczenie mają wierzba (*Salix sp.*), topola (*Populus sp.*), klon jesionolistny (*Acer negundo*), wiąz (*Ulmus sp.*), robinie



Rys. 13 Charakterystyka i typy zabudowy Warszawy (fragment), (Pietrusiewicz W. 2000)

(pot. akację) (*Robinia pseudoacacia*) oraz lipę (*Tilia cordata*) (na podstawie mapy zieleni Warszawy mapa.um.warszawa.pl).

W środowisku łągów nadwiślańskich najważniejszymi przedstawicielami fauny są: ssaki - bóbr europejski (*Castor fiber*), wydra europejska (*Lutra lutra*), kret europejski (*Talpa europaea*) łoś euroazjatycki (*Alces alces*); płazy: żabę zieloną (*Pelophylax kl. esculentus*) i brunatną oraz ptaki: m.in. Rybitwa rzeczna (*Sterna hirundo*), rybitwa białoczarna (*Sternula albifrons*), sieweczka rzeczna (*Charadrius dubius*), sieweczka obroźna (*Charadrius hiaticula*), mewa śmieszka (*Chroicocephalus ridibundus*), mewa siwa (*Larus canus*), mazurek (*Passer montanus*), szpak (*Sturnus vulgaris*), kwiczoł (*Turdus pilaris*) (Romanowski J, 2017).



Rys. 14 Kormoran (*Phalacrocorax carbo*), (W. Von Wright, 1838)

Czasem można też spotkać polującego lub suszącego skrzydła kormorana czarnego (*Phalacrocorax carbo*) (Rys. 14). Ze względu na występowanie siedlisk wymienionych ptaków, obszar koryta Wisły, fragmenty tarasu zalewowego oraz Osadnika Czerniakowskiego zostały objęte programem NATURA 2000, należąc do części chronionego dystryktu „Dolina Środkowej Wisły” (PLB140004).

3 ZASADY DZIAŁANIA UJEĆ PODDENNYCH W WARSZAWIE NA TLE OGÓLNEGO PRZEGLĄDU METOD UJMOWANIA WÓD RZECZNYCH

Najprostszym i najstarszym sposobem ujmowania/eksploatacji wód rzecznych jest bezpośredni pobór wód z koryta rzeki. Wody wiślane były w ten sposób eksploatowane niedawno, bo jeszcze na początku XIX wieku, o czym pisał W.H. Lindley w 1911 roku: „...mieszkańcy Warszawy przez długi czas poprzestawać musieli na wodzie czerpanej wprost z Wisły — nosili ją w naczyniach po stromych schodach ulic Celnej, Kamienne Schodki lub wozili w beczkach przez ulice: Mostową, Gołębią lub Brzozową”. Taki sposób zaopatrywania się w wodę był stosowany w przypadku niedostępności dogodniejszego źródła wody takiego jak np. studnie kopane. W mieście stołecznym wykorzystywane były także źródła: „Praga zaopatrywała się w wodę z rzeki Wisły, ze studzien, oraz z dosyć obfitych w czasach dawniejszych zdrojów, wypływających z dawnych piaszczystych wzgórz Brudnowskich i Targówka (obecnie Nowa Praga). Te źródła wpuszczone były do kamiennej galeryi na ulicy Wodnej i prowadziły wodę do gęsto zabudowanej w końcu zeszłego stulecia północnej części Pragi, zwanej Garbarze, obecnie park Aleksandryjski. Wypada nadmienić jeszcze o źródłach w podmiejskich miejscowościach: Kaskadzie i na Bielanych, z kąd (w szczególności z Bielani) jeszcze około pięćdziesiątego roku zeszłego stulecia przywożono wodę dla mieszkańców Warszawy” (Lindley 1911).

Wraz z dynamicznym rozwojem miasta i zwiększeniem liczby mieszkańców, pod koniec XIX konieczne było sięgnięcie po bardziej nowoczesne sposoby zaopatrzenia w wodę. Szczególne zasługi miał w „zaprowadzeniu w mieście wodociągów” pełniący obowiązki prezydenta Warszawy oficer rosyjski Sokrates Starynkiewicz (Słoniowa 1981). Konieczność zapewnienia dostaw wody dla społeczności oraz przemysłu miasta nazywanego „Paryżem Wschodu” było, jest i będzie problemem każdej generacji mieszkańców Warszawy.

3.1 RODZAJE UJMOWANYCH WÓD

Wody eksploatowane przez człowieka to przede wszystkim: wody powierzchniowe, infiltracyjne, źródlane oraz podziemne. Największe znaczenie jako źródło zaopatrzeni ludności mają wody powierzchniowe i podziemne (Heidrich, 1999).

Wody powierzchniowe dzielimy na wody opadowe oraz na wody stojące i płynące. Wody opadowe najczęściej wykorzystuje się w miejscach o utrudnionym dostępie do innych źródeł wody. Zazwyczaj wody bezpośrednio pochodzące z opadów deszczu lub śniegu pobiera się i magazynuje na wysoko położonych obszarach górskich, terenach krasowych oraz na wyspach bez dostępu do innego rodzaju wód słodkich (Heidrich, 1999).

Wody opadowe mają dużą podatność na przejmowanie zanieczyszczeń z atmosfery. W wodach opadowych szczególnie w pobliżu obszarów zurbanizowanych i przemysłowych stwierdza się obecność pyłów i rozpuszczonych gazów wyemitowanych do atmosfery przez przemysł. Są między nimi: amoniak, siarkowodór, tlenki azotu oraz siarki. W kontakcie z powierzchnią ziemi wody atmosferyczne przechwytyują zanieczyszczenia z gleb.

Znaczna część wód opadowych dociera do warstw wodonośnych w efekcie infiltracji. W środowisku geologicznym infiltrujące wody tracą zanieczyszczenia m.in. biodegradacji ulegają związki azotu (Macioszczyk, Dobrzyński 2007).

Wody eksploatowane przez ujęcia infiltracyjne zazwyczaj pochodzą ze sztucznie wywołanej infiltracji wód rzecznych studniami /drenami zlokalizowanymi w warstwie aluwiiów w sąsiedztwie koryta lub pod jego dnem. Taka infiltracja nazywana jest pośrednią. O bezpośrednim poborze wód infiltracyjnych mówimy w przypadku eksploatacji wprowadzanych do strefy aeracji przesiąkających wód powierzchniowych, na przykład ze stawów infiltracyjnych (Gabryszewski, Wieczysty, 1985). Jakość wód infiltracyjnych uzależniona jest od czasu przesiąku, wzrastając wraz z wydłużeniem czasu infiltracji oraz od udziału w wydatku ujęcia wód podziemnych, których skład jest na ogół lepszy od wód powierzchniowych (Gabryszewski, Wieczysty, 1985). Istotne znaczenie dla jakości infiltrujących wód ma także działalność rolnicza, a szczególnie nadmierne nawożenie, czy przemysłowa hodowla zwierząt, odpowiadająca za zwiększoną migrację związków m.in. azotu i fosforu do wód powierzchniowych i podziemnych (Dojlido 1995, Kowal, Świdarska-Bróz 2000).

Źródłem zaopatrzenia w wodę użytkową są często wody powierzchniowe. Wody te są najbardziej narażone na zanieczyszczenie. Najczęściej nie nadają się do bezpośredniego spożycia. Zawierają zazwyczaj pochodzące ze spływu powierzchniowego znaczne ilości zawieszin, związków humusowych oraz innych substancji koloidalnych (Nocoń 2017). Do rzek przepływających przez aglomeracje miejskie i obszary przemysłowe trafiają często ścieki bytowo-gospodarcze oraz poprodukcyjne (Wojciechowska i in. 2019). Ścieki te często zawierają metale ciężkie, fenole, cyjanki, pochodne ropy naftowej (węglowodorów) (Allan, Castillo, Capps 2021, Świdarska-Bróz 2000)

W zależności od pory roku temperatura wód powierzchniowych w Europie środkowej zmienia się w zakresie od 0°C do 25 °C. Duże wahania sezonowe temperatury wód powierzchniowych wpływają na zmiany ich składu chemicznego oraz tym samym na ich jakość

(Kowal, Świdrska-Bróz 2000). Przy wysokich temperaturach możliwy jest intensywny rozwój bakterii oraz glonów, szczególnie w wodach stojących (Heidrich, 1999).

Jakość wód podziemnych wzrasta wraz z czasem infiltracji zasilających wód opadowych. Wody podziemne zazwyczaj cechują się dużą zawartością soli żelaza, soli manganu oraz dwutlenku węgla. Obecność soli żelaza w wodach podziemnych sprzyja rozwojowi bakterii żelazowych (Nawrocki 2010). Utlenianie żelaza i manganu w wodach podziemnych prowadzi do powstania trudno rozpuszczalnych związków, które krystalizują na powierzchniach ziaren budujących szkielet gruntowy osadów przepuszczalnych (Nawrocki 2010). Mogą one powodować także kolmatację chemiczną np. drenów lub innych elementów ujęć wody, zmniejszając ich efektywność. Podwyższone stężenia soli żelaza i manganu w wodzie pogarszają także jej właściwości organoleptyczne (Popek, Wapińska 2009). Sezonowe zmiany temperatury wód podziemnych są zdecydowanie mniejsze niż wahania temperatur wód powierzchniowych. Średnia temperatura roczna dla wód podziemnych w okolicach Warszawy wynosi ok 7,5-8°C (Pazdro 1964).

3.2 Rodzaje ujęć

Ujęciem nazywamy zespół urządzeń przeznaczonych do eksploatacji wody powierzchniowej (stojącej lub płynącej) lub podziemnej z jednego punktu, wielu punktów albo z danego obszaru, w określonym celu lub zaopatrujących określony podmiot użytkujący (Słownik hydrogeologiczny, 2002). Według Bahadori (2016) przy projektowaniu i lokalizacji ujęć powinno się uwzględniać następujące elementy:

- Charakter źródła wody, a szczególnie skalę i częstotliwość wahań zwierciadła wody. Zbyt duże wahania jej poziomu mogą negatywnie wpływać na możliwości eksploatacji oraz jakość ujmowanej wody;
- Wymagania nawigacyjne (jeśli występują) i możliwości oczyszczania dna rzeki lub jeziora. Położenie ujęcia nie powinno kolidować z np. trasą żeglugi; w przypadku koryt rzecznych ich dno powinno cechować się naturalną wymianą rumowiska, która ogranicza możliwość zamulenia i kolmatacji mechanicznej urządzeń pobierających wodę;
- Lokalizacja ujęcia w bezpiecznej odległości od źródeł zanieczyszczeń;
- Liczba miejsc poboru wody w ramach jednego ujęcia. Dywersyfikacja punktów poboru zmniejsza ryzyko czasowego przerwania procesu ujmowania wody;
- Eksploatacja powinna być prowadzona zgodnie z odpowiednimi przepisami i na podstawie odpowiedniego pozwolenia. Wymóg ten ma na celu ochronę jakości

i wielkości zasobów, a także ograniczenie wpływu ujęcia na inne komponenty środowiska przyrodniczego, czy infrastrukturę.

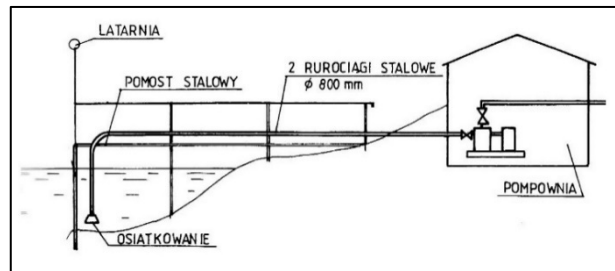
Ponadto, ujęcie powinno pokrywać zapotrzebowanie na wodę, dostarczać surowiec o odpowiedniej jakości, nie zakłócać stosunków wodnych (np. poprzez nadmierną eksploatację tworzącą lej depresji o zasięgu zagrażającym otaczającemu środowisku), oraz powinno być opłacalne ekonomicznie (Popek, Wapińska 2009).

3.2.1 Ujęcia wód powierzchniowych

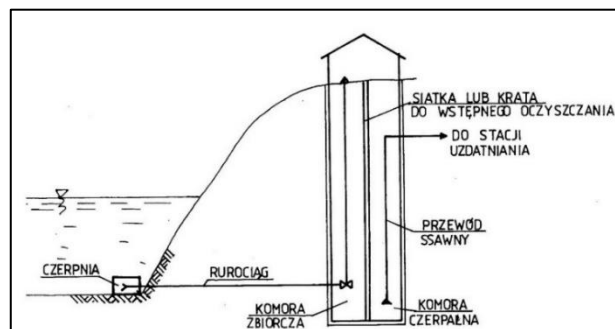
W przypadku ujęć eksploatujących wody rzeczne, ważnym jest, aby pobierana woda cechowała się wysoką i stabilną jakością. Ważna jest zatem lokalizacja ujęcia. Najlepiej, gdy ujęcia wód powierzchniowych ułożone są powyżej miast oraz w strefach koryta charakteryzujących się odpowiednią głębokością oraz prędkością przepływu. Najlepsze pod tym względem są strefy nurtu przy wklęsłym brzegu, zwane także płosami (Migoń 2013).

Urządzenie czerpiące wodę powinno być odpowiednio zabezpieczone przed lodem powierzchniowym i dennym, sryżem, a także przed rumowiskiem w przypadku jego nadmiernego transportu (Popek, Wapińska 2009). Ponadto dno części wlotowej instalacji ujmowania wody powinno znajdować się na takiej głębokości, aby uniknąć przechwytywania materiału wlezonego po dnie oraz ograniczyć pobór zawiesiny. Zazwyczaj jest to przynajmniej 1 m nad dnem koryta rzeki (Hofkes i in. 1983)

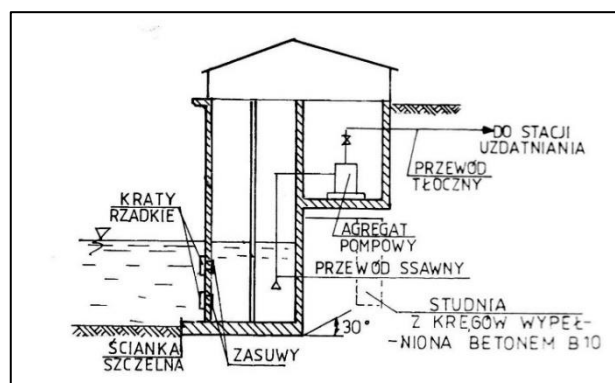
W przypadku małej głębokości koryta najczęściej wykonuje się ujęcia nurtowe (Rys. 15 i 16). Ujęcie tego typu posiada najczęściej osiatkowaną czerpnię umiejscowioną w nurcie rzeki,



Rys. 15 Schemat ujęcia nurtowe – ssawnego (Kalisz 1994)

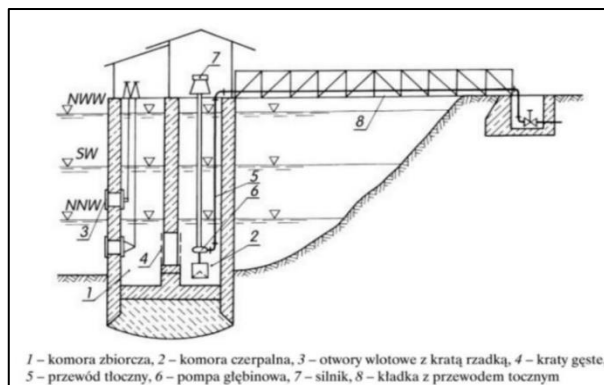


Rys. 16 Schemat ujęcia nurtowego – grawitacyjnego (Kalisz 1994)



Rys. 17 Schemat ujęcia brzegowego – komorowego (Kalisz 1994)

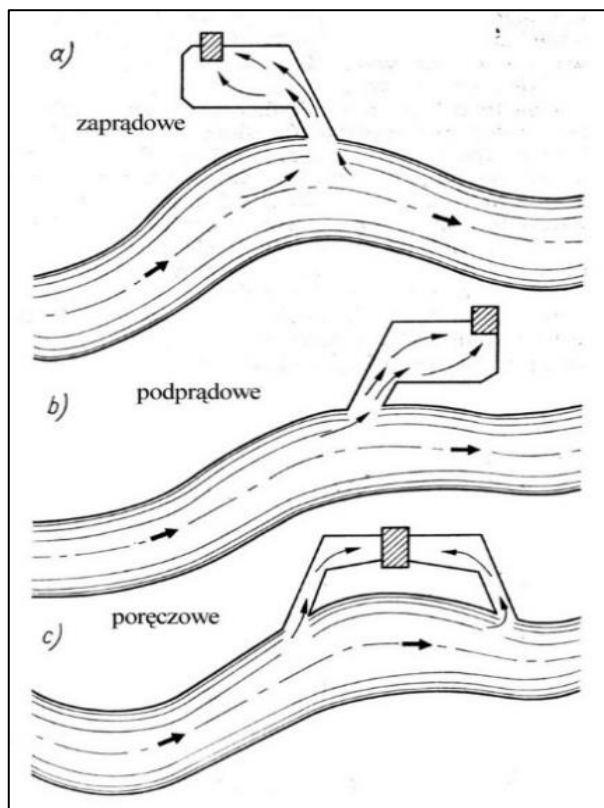
przewód grawitacyjny, lewarowy lub podłączony do pompy oraz komorę zbiorczą, do której dociera woda wstępnie oczyszczona przez zestaw krat lub sit. Wodą pobrana przesyłana jest do stacji uzdatniania. Przy dużych ujęciach wody wlot czerpni powinien być wyposażony w kratę o małych prześwitach 20 - 50 mm (Heidrich 1999).



Rys. 18 Schemat ujęcia wieżowego (Heidrich 1999)

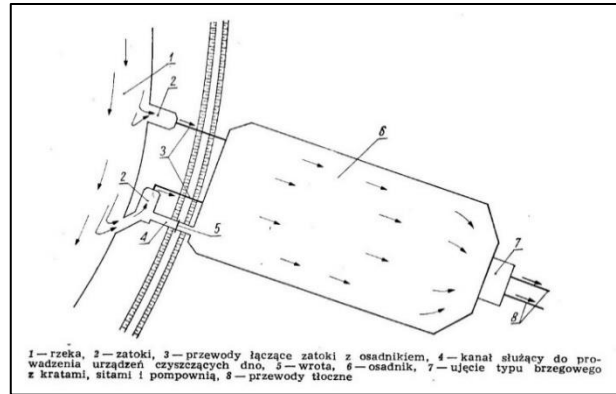
Gdy głębokość wody w rzece jest wystarczająco duża i linia nurtu występuje blisko wklęsłego brzegu możliwe jest zastosowanie ujęć brzegowych (Rys. 17). Wyróżnia się dwa rodzaje takich ujęć: komorowe i otwarte. W przypadku ujęcia brzegowego o typie otwartym woda grawitacyjnie dopływa do komory zbiorczej przez kanał lub przewód wlotowy. W wersji komorowej ujęcia brzegowego woda trafia bezpośrednio do studni zbiorczej przez perforowaną ścianę czołową komory wstępnej. Oba warianty brzegowych ujęć wymagają użytkowania rzadkich sit i krat, lub innych środków pozwalają na wstępny proces uzdatniania wody po przez eliminację zawiesin.

Kolejnym rodzajem ujęć pobierających wodę z wód płynących są ujęcia wieżowe (Rys. 18) budowane w przypadku występowania dużych głębokości rzeki. Ujęcia wieżowe zazwyczaj służą do pobierania wody za pomocą instalacji znajdujących się w korycie, w pewnym oddaleniu od brzegu. Tego typu ujęcia wyposażone są w komorę zbiorczą wraz ze ścianą czołową z otworami wlotowymi, zabezpieczonymi rzadką kratą przez które przedostaje się woda wstępnie oczyszczona. Woda przesyłana jest do stacji uzdatniania najczęściej dwoma przewodami ułożonymi na pomoście łączącym wieżę z brzegiem i dalej do stacji uzdatniania (Heidrich 1999).



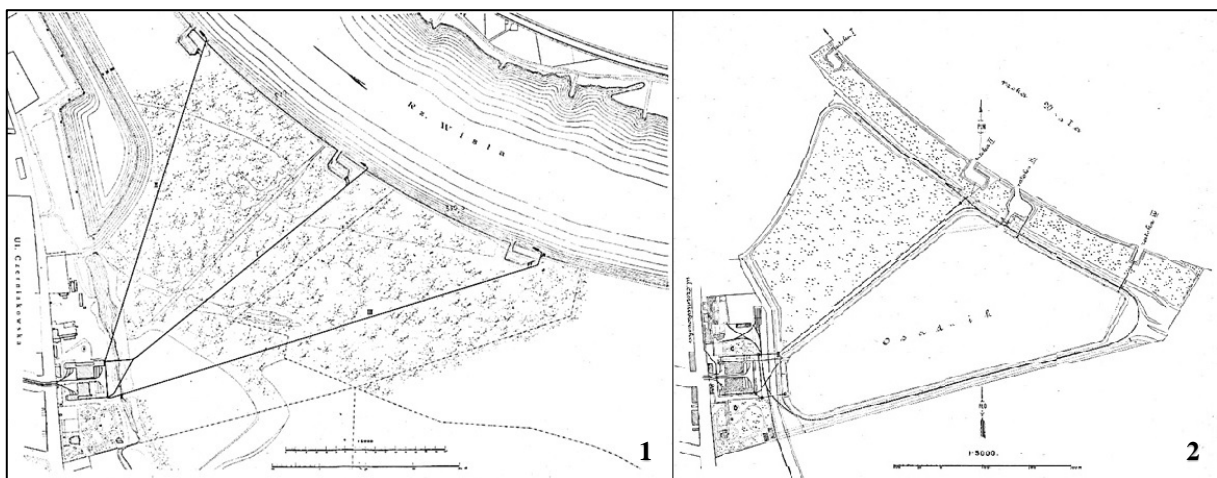
Rys. 19 Rodzaje ujęć zatokowych (Heidrich i in. 1977)

Dla potrzeb ujmowania wody z koryt dużych rzek, w których w warunkach niskich temperatur dochodzić może do powstawania lodu dennego oraz śryżu wykorzystuje się ujęcia zatokowe (Rys. 19). Ujęcia zatokowe na ogół są zlokalizowane na wklęsłym brzegu rzeki i zbudowane z czerpni typu brzegowego umieszczonej w jednej z trzech typów zatok: zaprądowej, podprądowej, poręczowej. Prędkość wody w kanale wlotowym czerpni w zatoce powinna być zredukowana o około 75%, względem prędkości wody w rzece, nie przekraczając 0,2 m/s (Heidrich 1999). W celu gromadzenia zawieszin i piasku zatoki powinny być przynajmniej 0,5 - 1 m głębsze niż koryto rzeki. Przepływająca woda w zatoce powinna posiadać prędkość nie większą niż 0,1 m/s i przekraczać prędkość w rzece w szczególności podczas formowania śryżu. Zatoki powinny być wyposażone w urządzenia umożliwiające ich zamykanie (Heidrich 1999). Zatoka powinna posiadać objętość pozwalającą na retencjonowanie wody na 0,5 - 4 godz. pracy ujęcia. Na wypadek wysokich wezbrań korona obwałowań zatoki powinna być położona 1 m ponad poziom wody stuletniej. Czasem w pobliżu ujęć zatokowych budowane są zbiorniki (Rys. 20) pełniące funkcje osadników. Posiadać one powinny odpowiednią pojemność zbliżoną do objętości kilkunastu dni ujmowania wody. Wody z osadnika są używane głównie podczas wezbrań, gdy ujęcia zatokowe są wyjęte z użycia (Heidrich 1999).



Rys. 20 Schemat ujęcia wody z zatokami przybrzeżnymi i osadnikiem ziemnym (Heidrich i in. 1977)

Ujęcia typu zatokowego były również stosowane w Warszawie w Stacji Pomp Rzecznych zlokalizowanej i zbudowanej w latach 1883-1886 według wytycznych



Rys. 21 Plan Stacji Pomp Rzecznych, 1 – ujęcia zatokowe zbudowane w 1906 r. (Lindley, Grotowski 1911), 2 – osadnik oddany do użycia w 1924 r. (Rabczewski, Rutkowski 1937)

W. H. Lindleya przy ulicy Czerniakowskiej. Ujęcie znajdowało się na lewym, wklęsłym brzegu Wisły, w miejscu, gdzie koryto zbliżało się do wyższej powierzchni tarasu plejstoceniowego. Lokalizacja taka pozwalała na budowę obiektu posiadającego dogodne warunki terenowe niezależnie od wysokości zwierciadła wody w rzece. Zadaniem Stacji Pomp Rzecznych było czerpanie wody rzecznej i tłoczenie jej na Stacje Filtrów na ulicę Koszykową do urządzeń oczyszczających. Początkowo woda była bezpośrednio pompowana z rzeki rurą ssącą przy zastosowaniu maszyn parowych. Dopiero w 1906 roku do ujęcia zostały dodane zatoki zaprawowe mające na celu ograniczenie ilości przedostającego się do czepni unoszonego przez wpływającą wodę mułu oraz piasku. Osad ten powodował uszkodzenia urządzeń wodociągowych, zwłaszcza podczas wezbrań, kiedy prędkość przepływającej wody wzrastała do 3,5 m/s.

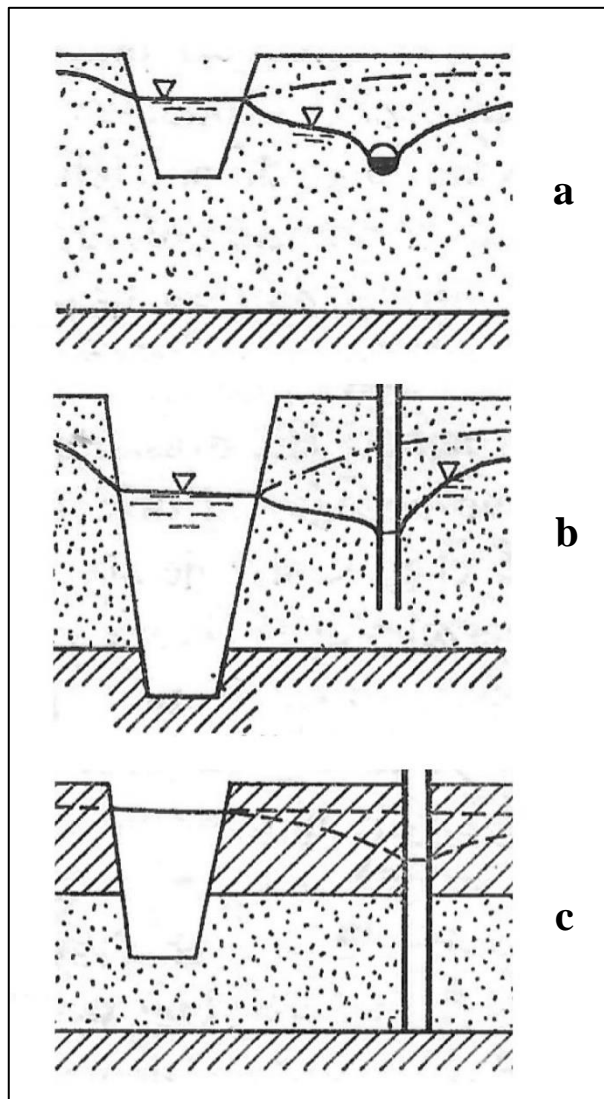
W 1924 roku do systemu poboru wody został dodany jeden osadnik z dwóch wcześniej planowanych, nazwany później Czerniakowskim (*Rys. 21*). Jego zadaniem było wstępne oczyszczenie ujmowanej wody z drobnych zawiesin poprzez powolną sedymentację. Zadaniem osadnika było także magazynowanie wody przez maksymalnie 3-4 dni podczas wysokich wezbrań, kiedy to wody rzeczne zawierały zbyt duży ładunek zanieczyszczeń. Zawartość zawiesin w takich warunkach przepływu mogła wówczas przekraczać 700 mg/l, co uniemożliwiało swobodną pracę ujęcia (Rabczewski, Rutkowski 1937). Rozmiary zbiornika o powierzchni wynoszącej około 18 ha i głębokości od 3 do 5 m pozwalają na zmagazynowanie do 1275000 m³ wody (Rabczewski, Rutkowski 1937). Eksploatacja przy zastosowaniu ujęć zatokowych i Osadnika Czerniakowskiego była prowadzona do momentu wybudowania ujęć poddennych. Przerwa w działaniu ujęcia nastąpiła pod koniec drugiej wojny światowej w 1944, po tym jak Niemcy wysadzili cały obiekt Stacji Pomp Rzecznych, łącznie z maszynami, budynkami, a także kolektorami i węzłami znajdującymi się pod powierzchnią ziemi (Janczewski 1971).

Obecnie ujęcia brzegowe nadal funkcjonują, ale są wykorzystywane jedynie w sytuacjach awaryjnych. W skład ujęć brzegowych zatokowych wchodzi Zatok nr 3, 4 i 5. Na co dzień wymienione zatoki pełnią funkcję magazynu/portu dla sprzętu pływającego, szczególnie podczas zimy. Aktualnie osadnik Czerniakowski pełni funkcję rezerwuaru wody pitnej w przypadku wystąpienia sytuacji nadzwyczajnych wykluczających pobór wody z pod dna Wisły. Może też stanowić zbiornik retencyjny w przypadku zajścia ekstremalnie wysokich wezbrań (mpwik.com.pl).

W okresie powojennym dynamiczny rozwój stolicy wraz ze wzrostem populacji mieszkańców spowodował zwiększenie zapotrzebowania na wodę i konieczność rozbudowy systemu jej ujmowania w postaci nowych ujęć – poddennych, infiltracyjnych.

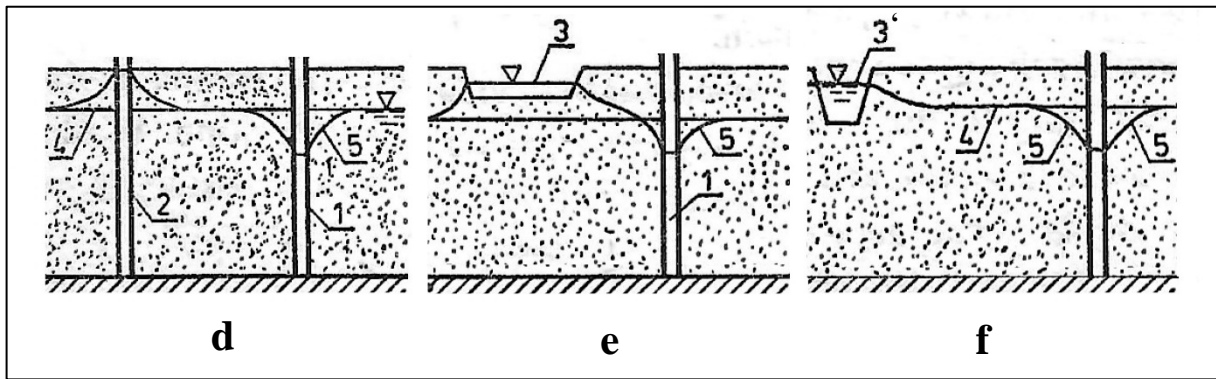
3.2.2 Ujęcia infiltracyjne

Specjalną grupę ujęć stanowią ujęcia infiltracyjne łączące zalety ujęć powierzchniowych i podziemnych. Ujęciami infiltracyjnymi nazywamy takie, które umożliwiają pobór wody podziemnej zasilanej wodami powierzchniowymi. Zasoby wód podziemnych są ograniczone, co wynika z geologicznej struktury podłoża i właściwości otaczającego je środowiska, a także z powolnego procesu ich odnawiania. Dlatego też, już na początku eksploatacji, wydajność ujęć wód podziemnych musi być precyzyjnie ustalona i nie może przekraczać poziomu odnawialnych zasobów. Co więcej, z biegiem czasu, zwłaszcza przy intensywnym użytkowaniu, wydajność tych ujęć zazwyczaj spada. Natomiast zaletą ujmowania wód podziemnych jest niewątpliwie znacznie lepsza jakość ujmowanych wód względem wód powierzchniowych. Wykorzystanie ujęć infiltracyjnych pozwala na zwiększenie zasobów pobieranej wody poprzez proces przesiąkania wód powierzchniowych, często w sposób naturalny z cieków lub zbiorników wodnych oraz na ujmowanie wód o jakości zbliżonej do wód podziemnych.



Rys. 22 Przykłady ujęć wykorzystujących infiltrację wymuszoną; a – zwierciadło swobodne, rzeka niezpełna, ujęcie drenem, b – zwierciadło swobodne, rzeka zupełna, ujęcie studnią, c – zwierciadło napięte, rzeka zupełna, ujęcie studnią (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)

W wyniku infiltracji wód powierzchniowych do ujęcia, wody te ulegają oczyszczeniu pod względem fizykochemicznym oraz mikrobiologicznym. Stopień oczyszczenia uzależniony jest od właściwości drogi jaką musiały przebyć oraz czasu filtracji (Gabryszewski, Wieczysty,

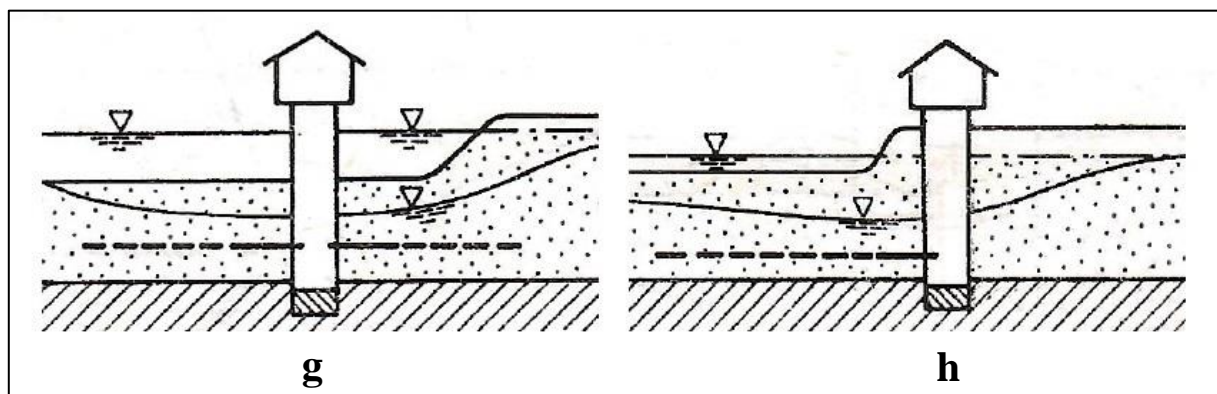


Rys. 23 Przykłady ujęć wykorzystujących infiltrację sztuczną oraz naturalną; d – infiltracja sztuczna z zastosowaniem studni chłonnej e – infiltracja sztuczna z zastosowaniem basenu nawadniającego, f – infiltracja naturalna; 1 – studnia ujmująca wodę, 2 – studnia chłonna, 3 – basen nawadniający, 3' – rzeka infiltrująca, 4 – naturalne zwierciadło wody, 5 – zdepresjonowane zwierciadło wody (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)

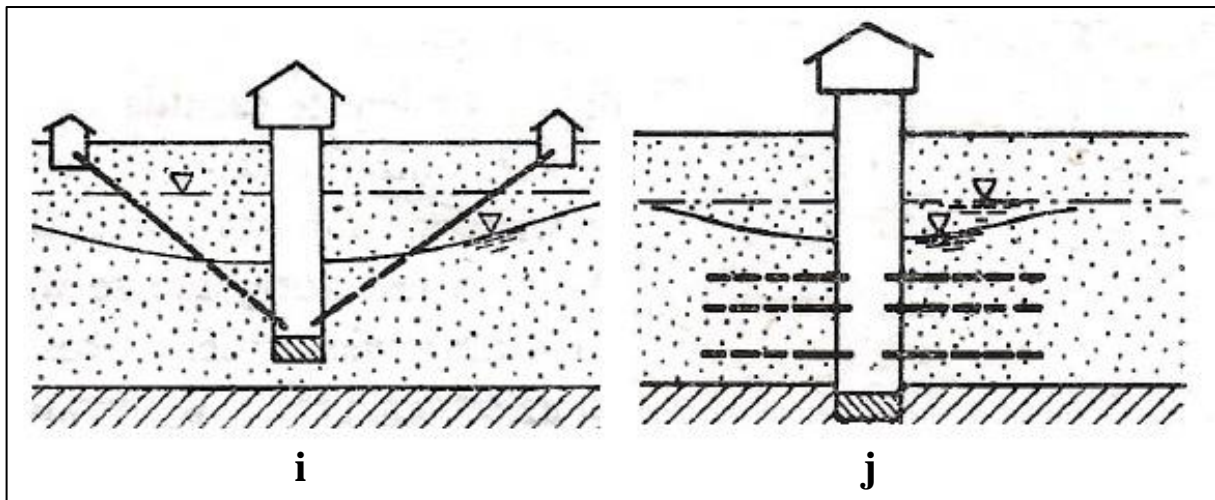
1985). Wykorzystywanie ujęć infiltracyjnych pozwala zatem na poprawienie jakości ujmowanej wody oraz zmniejszenie kosztów związanych z procesem jej uzdatniania (Feofanov, Riakhovskii 2018). Ujęcia infiltracyjne pozwalają na eksploatację wody z wysokimi wydajnościami.

Wadą ujęć infiltracyjnych jest możliwość spadku natężenia infiltracji wynikająca z kolmatacji dna zbiorników wodnych, studni chłonnych lub serii aluwiiów korytowych stanowiących złoża filtracyjne. Negatywne zmiany wodoprzewodności wynikające z kolmatacji są na ogół nieuniknione. W przypadku koryt rzecznych spadek wodoprzepuszczalności złoża filtracyjnego może następować w efekcie kolmatacji związanej np. wezbraniem. Prawidłowe działanie ujęć infiltracyjnych wiąże się z koniecznością stosowania działań naprawczych, polepszających przesączanie wody (Gabryszewski, Wieczysty, 1985).

W celu osiągnięcia stabilnego i na zadowalającym poziomie efektywności eksploatacji działania ujęć infiltracyjnych, niezwykle istotne jest ich prawidłowe zlokalizowanie. Miejsce



Rys. 24 Schematy studni infiltracyjnych, promienistych: g – ujęcie poddenne, nurtowe, h – ujęcie poddenne, brzegowe (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)



Rys. 25 Schematy studni infiltracyjnych, promienistych: i - ujęcie ukośne, j – ujęcie wielopoziomowe (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)

wyznaczone do budowy ujęcia infiltracyjnego powinno spełniać wymogi morfologiczne, hydrogeologiczne, geochemiczne oraz ekonomiczno-technologiczne. Obszar eksploatacji powinien być odpowiednio duży, aby możliwe było utworzenie strefy bezpośredniej ochrony sanitarnej ujęć. Warstwa wodonośna stanowiąca złożę dla wód infiltrujących powinna posiadać odpowiednią miąższość, przekraczającą 6 m oraz być zbudowana piasków gruboziarnistych lub żwirów zapewniających dobrą wodoprzepuszczalność (k -współczynnik filtracji wynoszący powyżej 1×10^{-4} m/s (Kowal, Świdarska-Bróz 2000). Pod względem geochemicznym warstwa wodonośna nie powinna zawierać materii organicznej w postaci wkładek gruntów organicznych (namulów, torfów i in.), które mogą być wymywane przez wodę infiltrującą i docierać do ujęcia (Kowal, Świdarska-Bróz 2000).

Ujęcia infiltracyjne można podzielić ze względu na sposób przesiąkania/filtracji wody. Według Gawryszewskiego oraz Wieczystego (1985) wyróżniamy trzy typy ujęć dla takiego podziału. Pierwszy z nich to ujęcia wykorzystujące infiltrację wymuszoną. W przypadku tych ujęć w wyniku obniżenia zwierciadła wody w pobliżu zbiornika wodnego lub rzeki następuje wymuszenie infiltracji wody do warstwy wodonośnej, czyli zmiana dynamiki i kierunku przepływu wód podziemnych skutkująca zasileniem danego ośrodka wód podziemnych (Rys. 22). W takiej sytuacji rzeki lub jeziora będące w większości przypadków naturalnym recypientem wód podziemnych, miejscowo zmieniają charakter z drenującego na infiltrujący, dzięki czemu możliwe jest zasilenie ujęć infiltracyjnych.

Drugim rodzajem są ujęcia wykorzystujące sztuczną infiltrację wody powierzchniowej przy zastosowaniu basenów, rowów, stawów nawadniających lub studni i drenaży chłonnych (Rys. 23 – schemat d i e). Ujęcia wykorzystujące infiltrację sztuczną na ogół są mało efektywne w eksploatacji i ze względu na konieczność zasilania wodą zewnętrzną oraz kosztowne

w utrzymaniu. Ponadto, są one bardziej narażone na zamulenie drenów jak i warstwy wodonośnej. Ujęcia tego typu są rzadko stosowane.

Ostatnim wyróżnionym typem (Gabryszewski, Wieczysty, 1985) są ujęcia wykorzystujące naturalną infiltrację wód powierzchniowych. O naturalnej infiltracji mówimy w przypadku, gdy wody powierzchniowe intensywnie zasilają wody podziemne ujmowane przez ujęcie, a sam proces poboru wody nie zmienia kierunku filtracji/przepływu (*Rys. 23* – schemat f, *Rys. 24* – schemat g i h). Wykorzystanie naturalnej infiltracji zazwyczaj możliwe jest przy występowaniu cieków lub zbiorników o infiltrującym charakterze współoddziaływania z wodami podziemnymi.

Wśród ujęć wykorzystujących naturalną lub wymuszoną infiltrację, wyróżniamy, ujęcia promieniste z zastosowaniem drenów. Studnie promieniste przeważnie składają się z szybowej studni zbiorczej oraz najczęściej poziomo ułożonych przewodów drenażowych. Wielką zaletą ujęć promienistych jest ich znacznie większa wydajność względem ujęć wód podziemnych budowanych w podobnych warunkach hydrogeologicznych, wynikająca z większej powierzchni chłonnej przy zastosowaniu zestawu drenów. Ponadto w wyniku zastosowania wielu drenów istnieje małe prawdopodobieństwo zatrzymania ciągłości pracy studni ze względu na niewystarczającą wydajność ujęcia. Studnie promieniste pozwalają na dostosowywanie położenia drenów zgodnie z występującymi warunkami granulometrycznymi w warstwie wodonośnej, a tym samym na omijanie soczewek utworów drobnoziarnistych mogących powodować kolmatację drenów. Ze względu na wymienione cechy studnie promieniste należą do długowiecznych i niezawodnych sposobów ujmowania wody. Dreny w przypadku ich płytkiego położenia względem powierzchni dna akwenu lub koryta rzeki mogą być też umiejscawiane w złożu filtracyjnym metodą odkrywkową (Gabryszewski, Wieczysty, 1985).

W przypadku użytkowania ujęć wykorzystujących infiltrację naturalną istnieje ryzyko wstrzymania poboru wody w sytuacji nagłego i znacznego pogorszenia jakości wody (Kowal 1999).

Zazwyczaj w promienistych ujęciach infiltracyjnych dreny instaluje się poziomo. W niektórych rozwiązaniach stosuje się dreny ukośne. Studnie ukośne mogą mieć dreny skierowane ku powierzchni terenu od szybu zbiorczego, wówczas mówimy o studniach V - kształtnych (*Rys. 25* – schemat i). Mogą one mieć także dreny ułożone w odwrotnym kierunku, wówczas przyjmują kształt odwróconej litery V.

Ze względu na rozmieszczenie drenów wyróżniamy ujęcia symetryczne oraz niesymetryczne. Symetryczne ułożenie drenów ujęć promienistych jest stosowane rzadko. Symetryczność ułożenia drenów jest głównie wykorzystywana w przypadku studni ujmujących wody podziemne, których dopływ nie jest ograniczony ze względu na ich położenie. W ujęciach znajdujących się blisko rzek lub zbiorników wodnych, przechwytyjących wody powierzchniowe, zazwyczaj stosuje się niesymetryczne rozłożenie drenów wynikające z nierównomiernego zasilania wodami infiltrującymi lub/i anizotropowości budowy warstwy wodonośnej. Większość ujęć promienistych jest jednopoziomowa, ze względu na obecność jednego poziomu drenów, zwykle położonych w przybliżeniu na jednym poziomie wysokości. W przypadku zasobnych warstw wodonośnych o odpowiednio wysokich parametrach wodoprzewodności i odnawialności zasobów wód podziemnych, a także o wystarczająco dużej miąższości, możliwe jest zastosowanie kilku poziomów przewodów drenażowych (Rys. 25 – schemat j). Wówczas takie ujęcie promieniste nazywamy mianem wielopoziomowego (Gabryszewski, Wieczysty, 1985).

Ujęcia infiltracyjne wykorzystują właściwości tzw. strefy hyporeicznej będącej naturalnym filtrem rzeczny, dzięki któremu ujmowana woda jest wstępnie oczyszczana.

3.2.3 Naturalny filtr rzeczy – charakterystyka strefy hyporeicznej

Strefa hyporeiczna to swoisty ekoton, przestrzeń zlokalizowana na dnie zbiorników wód powierzchniowych, gdzie dochodzi do intensywnej interakcji między wodami powierzchniowymi a podziemnymi (Jekatierynczuk-Rudczyk 2007; Marciniak i in. 2017). Zasięg strefy hyporeicznej jest różnie określany (Breteschko 1991, Williams 1984). Strefa hyporeiczna zaczyna się w nasyconych wodą utworach znajdujących się poniżej dna rzeki. Obejmuje obszar rozciągający się do brzegu rzeki, a także część wody płynącej, która może infiltrować do wód podziemnych (White 1993). Dolna granica strefy hyporeicznej sięga strefy, gdzie parametry chemiczne i fizyczne wody są praktycznie niezmiennie w czasie i przestrzeni. Górna granica pokrywa się ze strefą, gdzie mieszają się wody powierzchniowe i podziemne (Schwoerbel J., 1967).

Według Triska i współautorów (1989) strefę hyporeiczną można podzielić na dwa rodzaje, które różnią się tempem mieszania się wody. Są to strefa powierzchniowa, która leży bezpośrednio poniżej dna rzeki i która obejmuje prawie 98 % wód powierzchniowych oraz strefa ukryta, która leży na określonej głębokości i która obejmuje 10–98% wód powierzchniowych. Strefa ukryta cechuje się znacznymi gradientami koncentracji nurtientów i gazów rozpuszczonych w wodzie.

Strefę hyporeiczną zidentyfikowano w obrębie koryt rzecznych (Jones i in. 1996; Brunke i Gonser 1997; Boulton i in 1998; Brunke i t. 1998a, b; Edwards 1998; Hoehn 1998; Franken i współaut. 2001; Edwardson i in. 2003), w obrębie wód stojących np. jezior (Winter 1999) oraz w dnach nisz naturalnych wypływów wody podziemnej (Jekatierynczuk Rudczyk 2005).

Na funkcjonowanie strefy hyporeicznej mają wpływ procesy klimatyczne (Dobek 2007), hydrogeologiczne (Andrzejewska 2007; Brunke i in. 1998) oraz hydrologiczne (Gribovski i in. 2006), które jednocześnie mają wpływ na zmienność ekologiczną, botaniczną (Szoszkievicz i in. 2014), zoologiczną (Jekatierynczuk-Rudczyk, 2007) i chemiczną tej strefy (Mazurek i in. 2014).

Parametry środowiska wpływające na działanie strefy hyporeicznej to: warunki hydroklimatyczne, czy też budowa geologiczna obszaru, która wpływa na parametry hydrogeologiczne wód podziemnych. Strefa hyporeiczna występuje głównie na obszarach egzoreicznych, rzadko spotykana natomiast na obszarach o ujemnym bilansie wodnym (Jekatierynczuk-Rudczyk, 2007). Najlepiej rozwinięta strefa hyporeiczna występuje na terenach zbudowanych z okrzuchowych skał osadowych, które sprzyjają intensywnej wymianie wód powierzchniowych i podziemnych. Kluczową rolę w funkcjonowaniu tej strefy odgrywiają płytko położone wody podziemne, stanowiące pierwszy poziom wodonośny (Brunke i in., 1998). Rzeźba terenu oraz głębokość zalegania tych wód znacząco wpływają na ich wzajemne połączenie z siecią wód powierzchniowych. Proces ten prowadzi do ciągłego drenowania wód podziemnych przez wody powierzchniowe, co z kolei powoduje fluktuacje poziomu zwierciadła wód powierzchniowych w strefie hyporeicznej, zwłaszcza w niszach źródłiskowych (Marciniak i in. 2017).

Ustalenie relacji między wodami powierzchniowymi a podziemnymi ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia funkcjonowania strefy hyporeicznej. Ten ekoton odgrywa istotną rolę w wymianie substancji i energii między różnymi środowiskami wodnymi, co wpływa na procesy biogeochemiczne oraz dynamikę ekosystemów wodnych. Precyzyjna identyfikacja tych zależności pozwala lepiej interpretować złożone procesy zachodzące w tej strefie, jak również jej wpływ na jakość wody oraz bioróżnorodność ekosystemów wodnych.

Związek między wodami powierzchniowymi a podziemnymi może być bardziej skomplikowany niż się wydaje. Rzeka może jednostronnie zasilać wody podziemne, drenując je lub nie wykazywać żadnego związku z nimi (Hoehn, 1998). Zazwyczaj, rzeki mają charakter drenujący, odprowadzając wodę podziemną, ale w pewnych warunkach, np. po gwałtownych

opadach, ich charakter może się zmieniać. W takich sytuacjach, gdy poziom wód się podnosi, rzeka zaczyna zasilać wody podziemne. Przy niskich stanach wody rzeka działa drenująco, natomiast przy wysokich poziomach może pełnić funkcję infiltrującą, zasilając wody gruntowe (Jekaterynczuk-Rudczyk, 2007).

Według Brunke i Gonser 1997, strefa hyporeiczna funkcjonuje w trzech konfiguracjach:

- wody powierzchniowe zasilają wody podziemne — strefa infiltracji lub downwellingu;
- wody podziemne zasilają wody powierzchniowe — strefa drenażu, upwellingu lub eksfiltracji;
- wody powierzchniowe i podziemne w niewielkim stopniu kontaktują się ze sobą

Zespoły organizmów, które zasiedlają strefę hyporeiczną nazwano hyporheobiontami (Brunke i Gonser 1997). Duże znaczenie dla organizmów funkcjonujących w strefie hyporeicznej ma temperatura wody, znajdujące się w niej gazy oraz odczyn (Jekaterynczuk-Rudczyk, 2007). Najistotniejsze jest stężenie rozpuszczonego w wodzie dwutlenku węgla oraz tlenu, które odpowiadają za przebieg relacji chemicznych, które przekształcają substancje obecne w wodzie. Latem, ze względu na wyższe temperatury, dochodzi do intensywniejszego zużycia tlenu przez mikroorganizmy, co skutkuje niższym poziomem nasycenia wody tlenem (Pennak & Ward, 1986). Największą rolę w funkcjonowaniu strefy hyporeicznej ma epiliton (Edwards 1998). Główne gatunki to okrzemki, zielenice i sinice (Allan 1998). Dodatkowo w skład epilitonu wchodzi bakterie, grzyby, pierotniaki, mejofauna (Jekaterynczuk-Rudczyk, 2007). W strefie hyporeicznej występują także stygokseny (Gibert 1992) organizmy zasiedlające stosunkowo płytką warstwę hyporeiczną, używając osadów jako schronienie, zwłaszcza podczas niebezpiecznych zjawisk hydrologicznych takich jak powódzie, wezbrania, niżówki (Edwards 1998). Stygokseny giną w głębszych warstwach (Skalski 1994). Wyróżni się także stygofile organizmy zasiedlające w różnych momentach życia wody powierzchniowe lub strefę hyporeiczną (Jekaterynczuk-Rudczyk, 2007) oraz stygobionty, organizmy ubikwistyczne, czyli zamieszkujące utwory wód podpowierzchniowych oraz jaskinie (np. *niphargus arndti*), organizmy freatobiontyczne, które zasiedlają jedynie środowisko podziemne (np. *salendinella delamarei*) (Jekaterynczuk-Rudczyk, 2007). Fauna strefy hyporeicznej obejmuje różnorodne bezkręgowce, należące do takich grup i rzędów jak: *Oligochaeta*, *Nematoda*, *Gastropoda*, *Bivalvia* oraz *Crustacea* (w tym *Ostracoda*, *Copepoda*, *Amphipoda*, *Isopoda*), *Arachnida* (*Acarina*) i *Insecta* (*Collembola*, *Ephemeroptera*, *Plecoptera*, *Trichoptera*, *Diptera*) (Fraser et al., 1996; Edwards, 1998; Treonis et al., 1999; Williams, 1984, 2003; Fowler, Death 2001). Większość tych taksonów można także spotkać w wodach

podziemnych, jednak ich liczebność jest znacznie mniejsza niż w strefie hyporeicznej (Fraser, Williams, 1998).

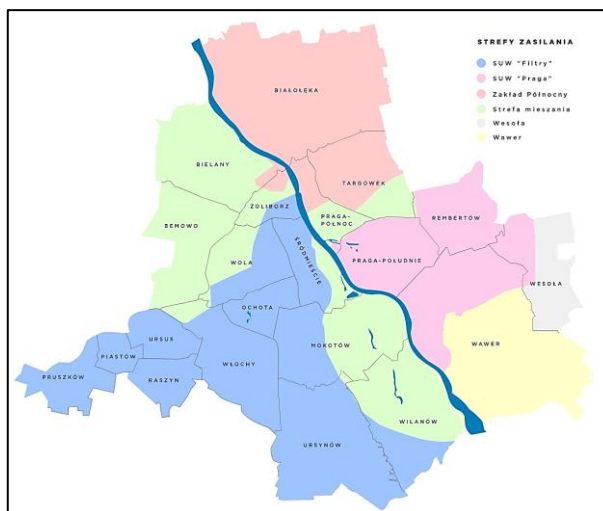
Różnorodność fauny strefy hyporeicznej może być kształtowana przez warunki fizyczne i chemiczne panujące w tej strefie (Hahn, 2005; Hahn & Matzke, 2005). Fauna podziemna, żyjąca w strefie hyporeicznej, wykształciła unikalne formy i cechy adaptacyjne, które umożliwiają przetrwanie w tym specyficznym środowisku (Bretschko, 1992; Danielopol, 1989). Charakterystyczne dla tych organizmów są niewielkie rozmiary oraz smukłe, elastyczne ciała, co pozwala im sprawnie poruszać się w porowatych osadach. Zauważono istotną korelację między wielkością organizmów interstycjalnych a porowatością osadów budujących strefę hyporeiczną, co sugeruje, że dostosowują się one do przestrzeni dostępnej w środowisku, w którym żyją (Olsen & Townsend, 2003).

Wpływ strefy hyporeicznej na procesy oczyszczania i transformacji jakości wody zależy w dużym stopniu od stopnia ingerencji w naturalne środowisko (Hancock, 2002). Podczas przemieszczania się wody przez grunt zachodzi wiele procesów fizycznych, chemicznych i biochemicznych, takich jak adwekcja, dyspersja, sorpcja, desorpcja, nityfikacja, denityfikacja oraz mieszanie z wodami podziemnymi. Procesy te wpływają na jakość wody infiltracyjnej i mają kluczowy wpływ na efektywność jej oczyszczania (Kowal, Świdarska-Bróz 1996, Zdanowicz 2002).

Na odcinku Wisły Warszawskiej na podstawie wieloletniej eksploatacji wody ujęciami infiltracyjnymi zauważono, iż woda po infiltracji poddennej podlega takim samym sezonowym wahaniom temperatury jak woda powierzchniowa. Pomimo krótkiego czasu trwania tego procesu, widoczna jest wyraźna poprawa jakości ujmowanej wody. Potwierdzają to zmniejszenie mętności, obniżenie wartości RWO, spadek absorbancji UV oraz zmniejszenie barwy, a także zauważalne są straty tlenu (Olejnik A., 2018). Ponadto, podczas infiltracji dochodzi do całkowitego zatrzymania planktonu, zmniejszeniem liczby bakterii, obniżeniem stężenia żelaza, a także usunięciem azotu amonowego (Pacholec, Zdanowicz 2008)

4 CHARAKTERYSTYKA WARSZAWSKICH UJEĆ INFILTRACYJNYCH

Aktualnie pobór wody z wykorzystaniem ujęć poddennych zlokalizowanych na odcinku Wisły Warszawskiej, stanowi około 70% zapotrzebowania miasta. Od 1986 roku, po uruchomieniu stacji uzdatniania Zakładu Północnego w Wieliszewie możliwe jest czerpanie wody ze sztucznego Jeziora Zegrzyńskiego utworzonego na Narwi. Ujęcie to stało się drugim znaczącym źródłem zaopatrzenia. Ujęcia infiltracyjne w korycie Wisły oraz woda ze stacji Wieliszew niemal całkowicie pokrywają zapotrzebowanie na wodę aglomeracji warszawskiej (99%). Pozostała niewielka część (1%) zapotrzebowania na wodę zaspokajana jest lokalnymi ujęciami wody podziemnej w Wawrze i Wesołej (mpwik.com.pl).



Rys. 26 Strefy dystrybucji wody produkowanej przez MPWiK dla aglomeracji warszawskiej – 2024 rok (mpwik.com.pl)

W skład zespołu warszawskich ujęć infiltracyjnych wchodzi Ujęcie Zasadnicze tzw. „Gruba Kaska” położone w korycie rzeki, lewobrzeżne ujęcia przewodowo-pompowe należące do Stacji Pomp Rzecznych: PU-1, PU-2, PU-3 i PU-4, oraz prawobrzeżne ujęcia uzupełniające UU-1 i UU-2. Woda infiltracyjna ujmowana wymienionymi studniami poddennymi trafia do dwóch stacji uzdatniania wody: SUW Filtry oraz SUW Praga, skąd dystrybuowana jest do większości dzielnic Warszawy oraz tzw. pasma pruszkowskiego, czyli do Michałowic, Piastowa oraz Pruszkowa (Rys. 26).

Ujęcia wykonane są tak zwaną metodą warszawską, polegającą na położeniu drenu w wykonanym refulerem wykopie w dnie koryta posiadają od kilku do kilkunastu promieniście ułożonych wokół studni zbiorczych drenów. We wszystkich ujęciach dreny o różnych długościach położone są asymetrycznie. W przypadku ujęcia uzupełniającego UU-2 część drenów ułożona jest promieniście-równolegle względem koryta (mpwik.com.pl).

Dreny powinny być przykryte odpowiednią miąższością rumowiska stanowiącego naturalne złożo filtracyjne o określonej granulometrii i zagęszczeniu, determinujących czas filtracji. Miąższość aluwii nad drenami powinna mieścić się w zakresie od 5 do 6 m, a czas infiltracji powinien być bliski 30 godzinom (Pacholec B., Zdanowicz A., 2008). Czas ten pozwala na uruchomienie naturalnych procesów wymaganych do wstępnego oczyszczenia

wody, które przebiegają głównie w strefie hyporeicznej (Boulton i in. 1998, Jekatierynczuk-Rudczyk 2007, Marciniak i in. 2023). Zbyt mała miąższość może powodować zwiększenie wydajności drenu, przy jednoczesnym pogorszeniu jakości wody. W przypadku większej miąższości aluwialnego złoża filtracyjnego czas filtracji się wydłuża a do drenu dopływa woda teoretycznie lepiej oczyszczona.

Dla prawidłowego działania warszawskich ujęć infiltracyjnych konieczne jest zachowanie ciągłej i niezaburzonej, naturalnej wymienności rumowiska rzecznego, zapewniającej utrzymanie złoża na odpowiednim poziomie wodoprzewodności. W przypadku zatrzymania lub wyhamowania naturalnej wymiany złoża zwiększa się prawdopodobieństwo kolmatacji przestrzeni międzyziarnowych piasków korytowych oraz drenów. Ponadto, wraz ze zwiększoną akumulacją materiału aluwialnego nasila się proces konsolidacji, a tym samym zmniejsza się porowatość efektywna i współczynnik filtracji złoża. Ze względu na dużą częstotliwość zmian hydrodynamicznych w korycie, utrzymanie w miarę stałej miąższości złoża o odpowiednich parametrach nie jest proste i wymaga zabiegów naprawczych. Do prac tych wykorzystywane są pogłębiarki (aktualnie w użyciu są pogłębiarki „SAWA” i „ZSRT”) oraz spulchniaczy hydraulicznych (aktualnie w użyciu są tzw. „Chudy Wojtek II i Chudy Wojtek III”). Zabiegi z zastosowaniem wymienionych jednostek pływających wykonywane są głównie nad drenami, w miejscach narażonych na zbyt małe natężenie wymiany złoża i jego kolmatacje. Prędkość przepływu wody pozwalająca na naturalną wymianę złoża, według informacji podanych przez MPWiK, powinna przekraczać 0,8 m/s, zaś wysokość słupa wody nad złożem powinna wynosić 1 m (Koczko, Pacholec, Mossakowska 1995).

Spulchnianie złoża przy użyciu „Chudych Wojtków” często ma także na celu usunięcie z wierzchniej warstwy aluwii materii organicznej oraz drobnych frakcji, które okresowo pojawiają się tu jako przewarstwienia (Falkowski i inni 2004, Pacholec, Zdanowicz 2008). Problem nadmiernej akumulacji materiału drobnoziarnistego, pojawia się zazwyczaj przy niskich stanach wody i jest szczególnie intensywny w strefach przybrzeżnych koryta, z dala od linii nurtu. Dochodzi wtedy do wypływania tych części koryt, a dreny w takich strefach pobierają wodę zastoinową (Pacholec, Zdanowicz 2008). Zwiększa się w takim przypadku udział w wydatku drenu poboru wód podziemnych względem wód infiltracyjnych, a zatem zwiększa się zawartość w wodzie czerpanej manganu i żelaza. Miejsca w których zachodzi akumulacja najdrobniejszego materiału mineralnego narażone są również na koncentrację unoszonej przez wodę materii organicznej niepożądaną w procesie uzdatniania wody (Falkowski i inni 2004).

W strefach, w których woda osiąga najwyższe prędkości, czyli w strefie nurtowej przepływu pojawia się problem pogłębiania koryta i zbyt małej miąższości złoża nad drenami. W takich miejscach najczęściej stosuje się dosypywanie piasku refulerem z innych części koryta.

Dla prawidłowej pracy ujęć infiltracyjnych ważne jest także prawidłowe ich użytkowanie. Ilość ujmowanej wody z jednego metra bieżącej części perforowanej drenu w początkowych latach eksploatacji ujęć warszawskich była



*Fot. 2 Pozostałość skorodowanego drenu
(Fot. P. Bartold 2024)*

znacznie wyższa niż obecnie i przekraczała nawet $2 \text{ dm}^3/\text{s}$. Doprowadzało to jednak do szybkiej kolmatacji aluwialnego złoża filtracyjnego w pobliżu drenów. Na podstawie wieloletnich doświadczeń w latach 90 minionego wieku przyjęto zakres wydajności jednostkowej w zakresie od $0,35$ do $1,4 \text{ dm}^3/\text{s}$ (Wyszkowski, Matlak, Grunwald, Stefańczyk 1993). Obecnie wartość tego parametru nie powinna przekraczać $0,8 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy depresji 3 m . Przy depresji ok. 1 m wydajność jednostkowa drenów powinna mieścić się w granicach $0,6-0,7 \text{ dm}^3/\text{s}$. Maksymalna dopuszczalna depresja została oszacowana na poziomie 4 metrów przy przepływach wezbraniowych. Zwiększona depresja ($> 3 \text{ m}$) stosowana jest podczas wezbrań w celu przeciwdziałania unoszenia i wypłukiwania złoża znad drenów. Maksymalne obciążenie drenu nie powinno być utrzymywane dłużej niż przez 2 dni. Poza ograniczeniem dopuszczalnej wartości wydajności z jednego metra drenu, określono dopuszczalną prędkość dopływu wody do drenu na poziomie $1/30$ wartości współczynnika filtracji aluwiiów korytowych. Przy zachowaniu odpowiedniej prędkości dopływu wody do drenu złoże piaskowo-żwirowe powinno być chronione przed wymywaniem najdrobniejszych frakcji z jego szkieletu ziarnowego (przed sufozją) (Wyszkowski, Matlak, Grunwald, Stefańczyk 1993).

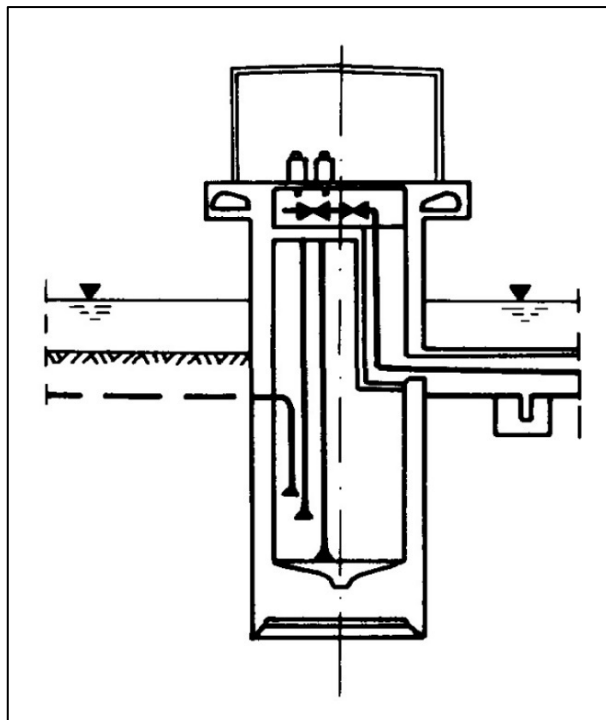
Dreny wykorzystywane w konstrukcji warszawskich ujęć infiltracyjnych (tzw. metody warszawskiej ujmowania wód) są stalowymi perforowanymi rurami. Ich długość i średnica zależą od ujęcia oraz warunków panujących w złożu. Przewody drenażowe narażone są na kolmatację mechaniczną oraz chemiczną. Zaistnienie kolmatacji mechanicznej zwykle związane jest z obecnością w złożu filtracyjnym frakcji pylastych oraz ilastych, a także materii

organicznej. Kolmatacja chemiczna najczęściej przejawia się krystalizacją na powierzchni drenów tlenków i wodorotlenków żelaza.

Same dreny ze względu na materiał z jakiego zostały wykonane – są to rury stalowe podlegają korozji (*Fot. 2*). Ze względu na specyfikę pracy drenów konieczne jest stała kontrola ich stanu technicznego. Dreny są wymieniane średnio co 15 lat (informacja uzyskana w MPWiK).

4.1 Ujęcie zasadnicze – „Gruba Kaśka”

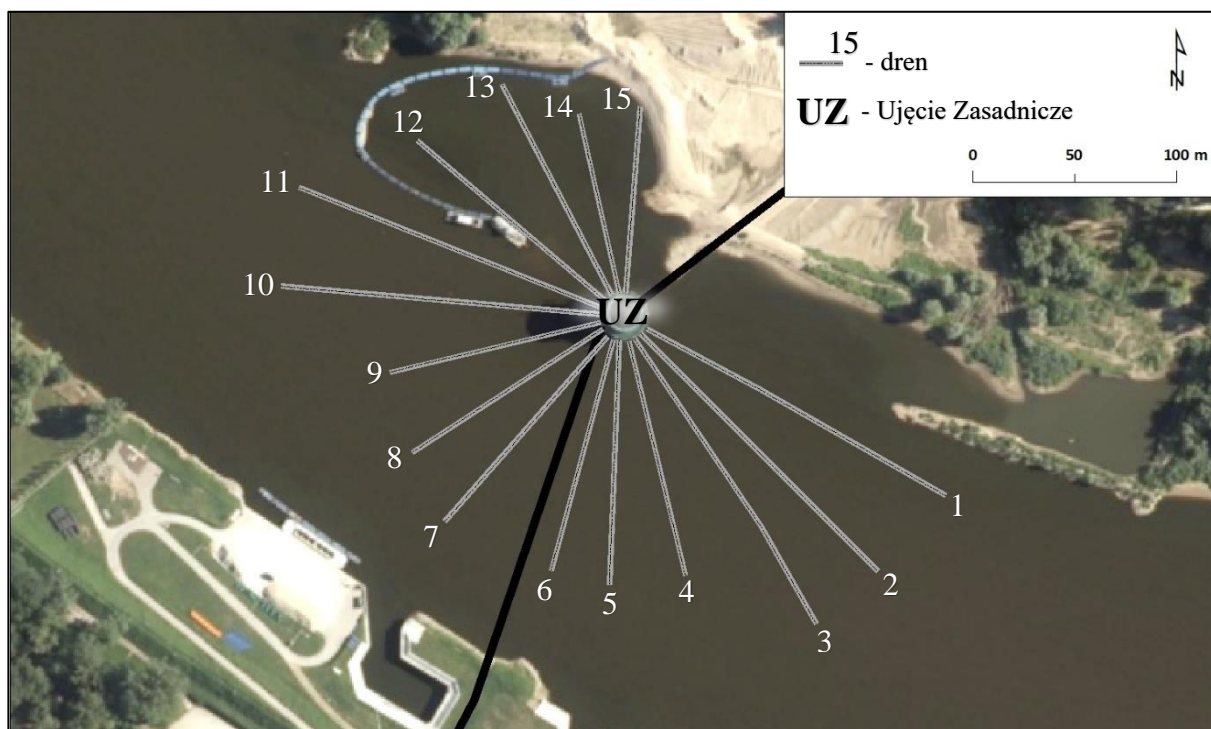
Pierwszym ujęciem infiltracyjnym zbudowanym w Warszawie jest Ujęcie Zasadnicze położone jako jedyne w Europie w nurcie rzeki. Ujęcie to nazwane przez mieszkańców stolicy „Grubą Kaśką” (*Rys. 27*). Wcześniej nazywano tak nadal istniejącą 18-wieczną studnię, znajdującą się przy placu Bankowym. Pomysł budowy ujęcia podziemnego w Warszawie pojawił się już w latach 50 dwudziestego wieku. Pomysłodawcami „Grubej Kaśki” byli Stanisław Wojnarowicz pełniący funkcję dyrektora Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie oraz główny konstruktor ujęcia Włodzimierz



*Rys. 27 Schemat konstrukcji ujęcia „Gruba Kaśka”
(Kowal, Świdarska-Bróz., 2000)*

Skoraszewski. Budowę ujęcia rozpoczęto 31 marca w 1953 roku (mpwik.com.pl). Ze względu na szereg problemów związanych głównie z dnem Wisły oraz prędkością przepływu w nurcie rzeki, studnię zbiorczą wzniesiono dopiero w grudniu 1957 r. Następnie przystąpiono do układania drenów metodą bez kesonową. Nie zdała ona jednak egzaminu. Nowa metoda posadowienia drenów opracowana przez Jerzego Wojtkowskiego zakładała wprowadzanie drenów od środka studni w kesonie., Pozwoliła ona na prawidłowe ułożenie przewodów drenażowych i przeprowadzenie próbnych pompowań (Koczko, Pacholec, Mossakowska 1995).

Według początkowego projektu Ujęcie Zasadnicze miało być wielopoziomowym ujęciem infiltracyjnym posiadającym 20 drenów na dwóch poziomach. Z tego pomysłu zrezygnowano po uzyskaniu zadawalających wyników wydajności ujęcia przy wykonaniu



Rys. 28 Schemat ułożenia drenów Ujęcia Zasadniczego (czarną linią zaznaczono tunel prowadzący do UZ z SUW Praga oraz kanał przesyłowy prowadzący do Stacji Pomp Rzecznych).

próbnego pompowania z zastosowaniem jednego poziomego drenażu (Pacholec, Wąsowski, Dąbrowska, Krekora, Nowak 1999). Woda z czerpana przez „Grubą Kaškę” zaczęła docierać do warszawiaków dopiero po ponad 11 latach od rozpoczęcia budowy we wrześniu 1964 roku. W roku 2002 Ujęcie Zasadnicze zostało wyremontowane i zmodernizowane, dzięki czemu została m.in. zwiększona przepustowość i wydajność całej instalacji (mpwik.com.pl).

Pierwsze ujęcie infiltracyjne w Warszawie położone jest w 509,9 kilometrze Wisły, w korycie w odległości 186 metrów od brzegu lewego oraz około 50 metrów od brzegu prawego. W pobliżu ujęcie znajdują się dwie ostrogi, w tym jedna tamą podłużną mającą kształt litery L. Nazywana jest przez warszawiaków opaską Legii.

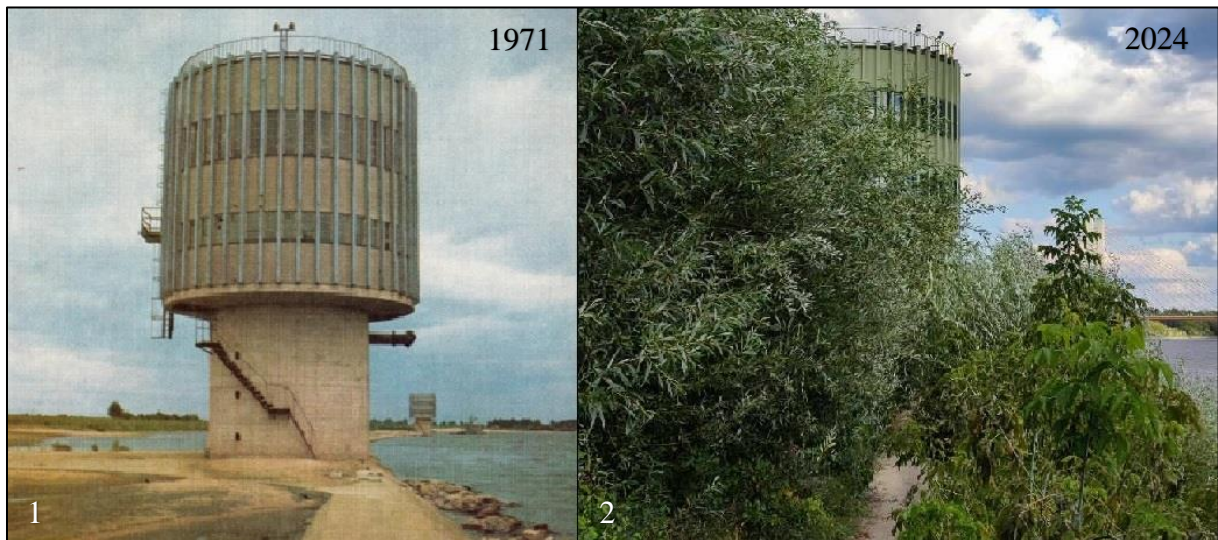
Konstrukcję studni zbiorczej tworzy walec żelbetonowy o średnicy wewnętrznej 11 m i zewnętrznej 13,8 m, oraz obwodzie wynoszącym 44 metry. Do „Grubej Kaški” od Stacji Uzdatniania Wody „Praga” prowadzi tunel o długości 311 metrów, którym obsługa obiektu może się dostać do jego środka. Konstrukcja ujęcia posadowiona jest na rzędnej 48 m n.p.m., w przybliżeniu 30 metrów pod dnem rzeki. Dno studni zbiorczej o pojemności maksymalnej 1150 m³ położone jest na 56,34 m n.p.m. Ujęcie Zasadnicze posiada 15 promieniście ułożony drenów skierowanych głównie w stronę lewego brzegu Wisły (Rys. 28). Każdy dren położony jest na stałej wysokości 70,5 m n.p.m. i w zamierzeniu przykryty powinien być odpowiednią miąższością złoza wynoszącą od 4 do 6 m (w zależności od ruchu rumowiska). Dreny Ujęcia Zasadniczego posiadają średnice od DN 300 (30,4 cm) do DN 450 (45,7 cm). Całkowita

długość drenów tego ujęcia wynosi ok 2033 m, z czego blisko 91% (1850 m) długości stanowi część perforowana. Wydajność maksymalna Ujęcia Zasadniczego wynosi 260 400 m³/d, czyli 10 850 m³/h, zaś średni pobór nie przekracza 193 000 m³/d. Optymalna wydajność eksploatacyjna drenów wynosi od 0,4 do 0,8 dm³/s z 1 metra perforacji, zaś maksymalna 1.0 dm³/s/m. Zazwyczaj depresja na Ujęciu Zasadniczym przyjmuje wartość w zakresie od 0,5 do 2 m. Maksymalna bezpieczna wartość depresji dla UZ to 4 m (na podstawie informacji uzyskanych w MPWiK).

Wśród stwierdzonych przez MPWiK w Warszawie problemów eksploatacyjnych związanych z ujęciem infiltracyjnym „Gruba Kaśka” wymienia się nadmierne przykrycie drenów nr od 1 do 6, szczególnie przy niskich i średnich stanach rzeki Wisły, wynikające z powstawania wysp piaszkowych i przykos. Problem nadmiernego przykrycia obserwowany jest także nad drenami o charakterze brzegowym nr 13-15. W złożu piaskowym nad drenami 13, 14, 15 przy tworzeniu się przykos obserwuje się także sedimentację warstewek drobnych frakcji, które utrudniają dopływ wody infiltracyjnej do drenów (Pacholec, Zdanowicz 2008). Nadmiar piasku jest usuwany (refulowany) przez pogłębiarkę i odkładany na brzegu w pobliżu Ujęcia Zasadniczego.

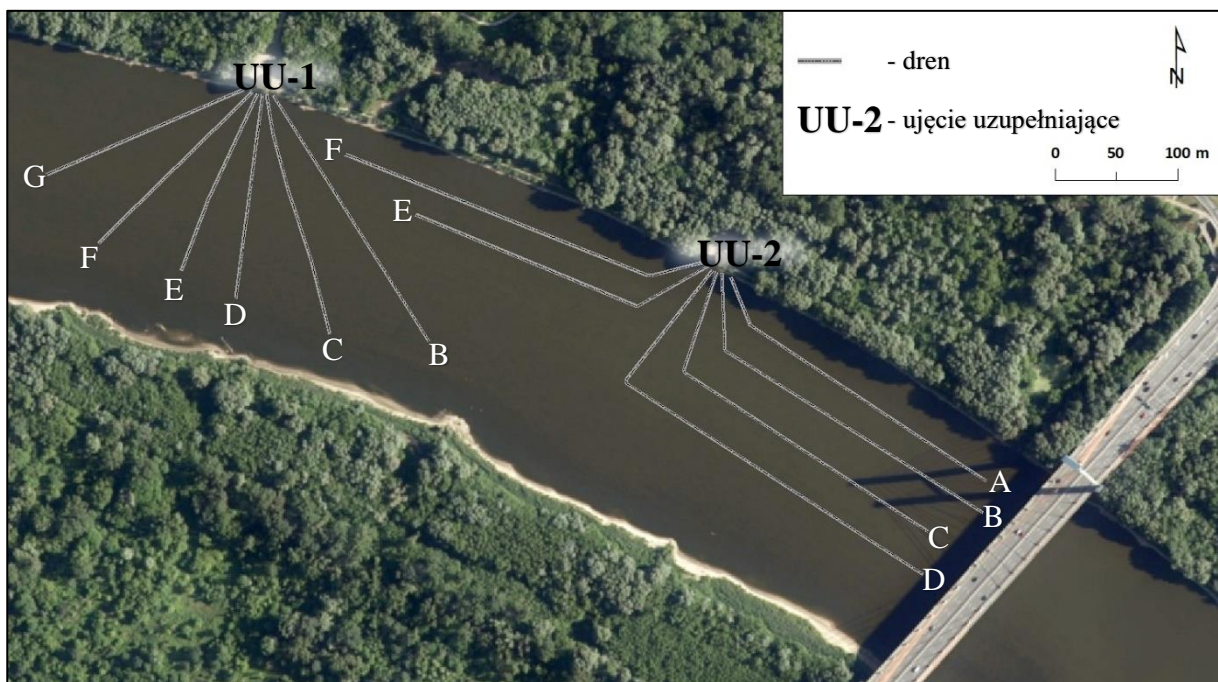
4.2 Ujęcia prawobrzeżne: UU-1 I UU-2

Rozwój aglomeracji warszawskiej powodował stały wzrost zapotrzebowania na wodę. Odpowiedzią na to była decyzja o budowie dwóch mniejszych studni przybrzeżnych o podobnej do „Grubej Kaśki” konstrukcji (Fot. 3). Budowę ujęcia uzupełniającego nr 1 zakończono w 1969 roku, zaś ujęcie nr 2 zostało oddane do użytku rok później w 1970 roku. Ujęcie uzupełniające nr 1 jest umiejscowione w 508,1 kilometrze biegu Wisły na jej prawym brzegu, w odległości ponad 1,8 km od Ujęcia Zasadniczego („Gruba Kaśka”). Konstrukcja studni zbiorczej stanowi żelbetonowy walec o średnicy wewnętrznej wynoszącej 6,0 m i zewnętrznej 7,6. Studnia zbiorcza posadowiona jest w osadach rzecznych na rzędnej 59,8 m n.p.m. zaś jej dno jest położone na rzędnej 64,85 m n.p.m. Wieża ujęcia od powierzchni terenu posiada wysokość około 19 metrów. Maksymalna wydajność studni to 56 000 m³/d. Przeciętnie eksploatacja dochodzi do 43 000 m³/d. System drenażowy ujęcia uzupełniającego nr 1 składa się z 6 perforowanych rur o łącznej długości około 1114 m. Długość części perforowanej drenów wynosi ok. 902 m stanowiąc 81% całości. Średnica użytych drenów wynosi od DN 300 (30,4 cm) do DN 400 (40,6 cm). Dreny położone są poziomo na rzędnej 70,5 m n.p.m. (na podstawie informacji uzyskanych w MPWiK).



Fot. 3 Ujęcia uzupełniające UU-1 i UU-2 (1. Rok 1971, fot. – fotopolska.eu, 2. Rok 2024, fot. P.Bartold)

Ujęcie uzupełniające nr 2 zlokalizowane jest w 507,7 km biegu Wisły i znajduje się w odległości około 330 m od mostu Siekierkowskiego. UU-2 posiada niemal identyczną konstrukcję jak ujęcie UU-1 w tym wymiary studni zbiorczej. Dno studni zbiorczej położone jest na rzędnej 64,3 m n.p.m. Wydajność maksymalna jest znacznie większa niż w przypadku UU-1 i wynosi 120 000 m³/d. Wydajność przeciętna mieści się w zakresie 82 500 – 85 000 m³/d. Woda czerpana jest przez 6 drenów ułożonych w sposób promieniście-równoległy (Rys. 29). Łączna długość drenów wynosi ok. 1892 m z czego 1728 m stanowi część perforowana (91%). Średnica drenów wynosi od DN 300 (30,4 cm) do DN 450 (45,9 cm). Wszystkie dreny ujęć UU-1 i 2 położone są poziomo na jednakowej rzędnej 70,5 m n.p.m. Maksymalna depresja



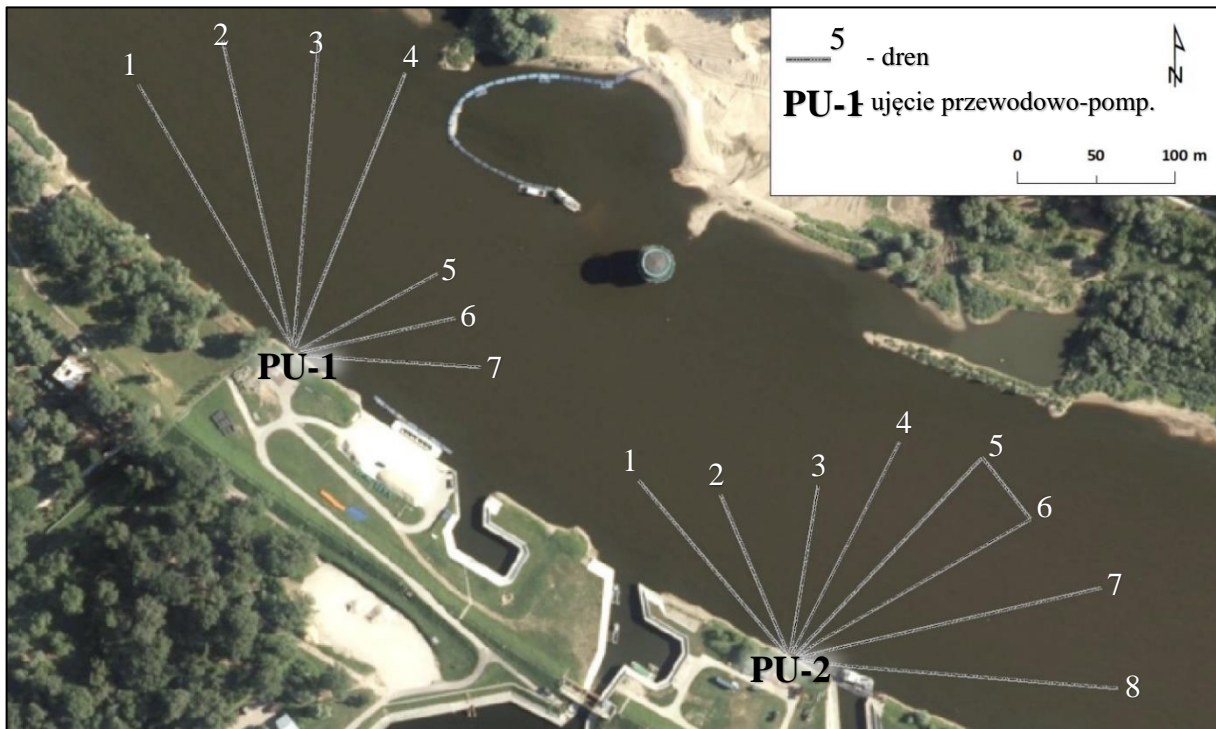
Rys. 29 Schemat ułożenia drenów ujęć UU-1 i UU-2

dla ujęć uzupełniających nie powinna przekraczać 4 m. Depresja optymalna mieści się w zakresie od 1-3 m. Maksymalna przyjęta wydajność eksploatacyjna drenów wynosi $1 \text{ dm}^3/\text{s}$ z jednego metra części perforowanej drenu. Optymalna wydajność eksploatacyjna drenów mieści się w zakresie od $0,6$ do $0,8 \text{ dm}^3/\text{s/m}$ (na podstawie informacji uzyskanych w MPWiK). Położenie drenów ujęć uzupełniających pokrywa się z przebiegiem linii nurtu, determinując czasowe niedostateczne ich przykrycie, szczególnie podczas wezbrań. Takie zdarzenia są jednak krótkotrwałe.

4.3 Ujęcia lewobrzeżne: PU-1, PU-2, PU-3 I PU-4

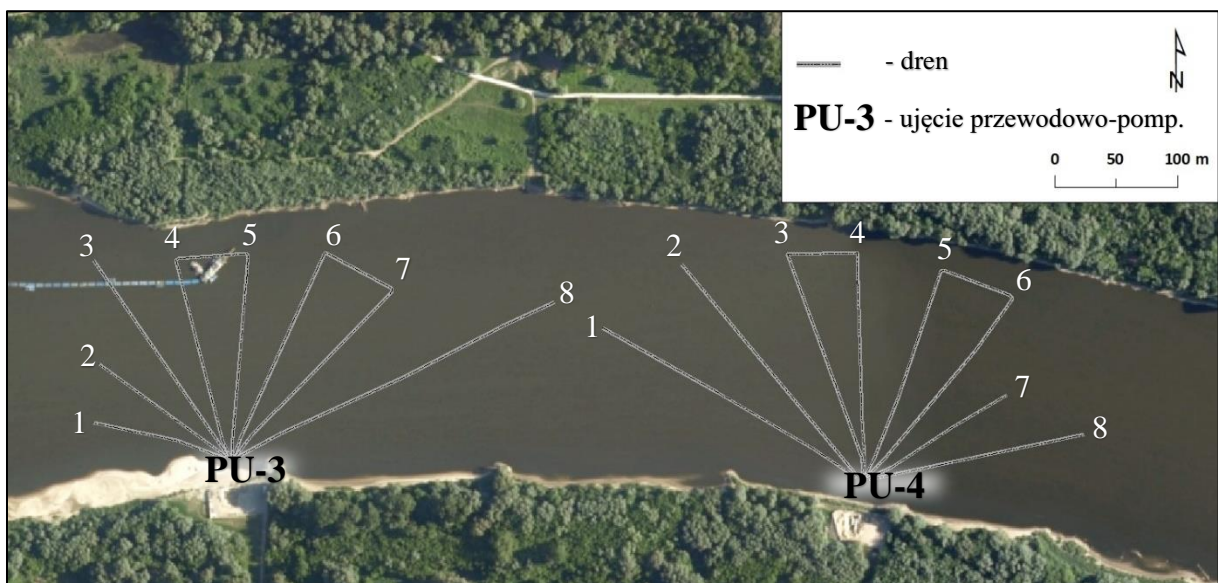
W celu zapewnienia stabilnych dostaw wody przy stale rosnącym zapotrzebowaniu, na początku lat 90 dwudziestego wieku pojawił się pomysł budowy ujęć infiltracyjnych po lewej (warszawskiej) stronie koryta. Pierwszym ujęciem lewobrzeżnym było PU-1 zbudowane w 1993 roku. W latach 1995, 1998 oraz 2000 oddano do użytku kolejne ujęcia infiltracyjne: PU-2, PU-3 i PU-4 (mpwik.com.pl). Lewobrzeżne ujęcia (*Rys. 30 i 31*) przewodowo-pompowe (PU-1, 2, 3 i 4) wchodzi w skład Stacji Pomp Rzecznych będącej obiektem stacji uzdatniania wody „SUW Filtry”. W przeciwieństwie do ujęć praskich, ujęcia znajdujące się na lewym brzegu Wisły nie posiadają części wieżowej ze studnią zbiorczą. W przypadku ujęcia PU-1 oraz ujęć posiadających podobną konstrukcję PU-2, 3 i 4 woda czerpana drenami trafia do komory zbiorczej o kształcie litery T, znajdującej się 13 m pod powierzchnią terenu. Takie rozwiązanie pozwoliło na ograniczenie kosztów budowy przy osiągnięciu podobnych wydajności ujęć. Ponadto ujęcia lewobrzeżne pozbawione są kosztownej żelbetonowej konstrukcji studni zbiorczej i nie powodują zaburzeń w przepływie wody w korycie rzeki, szczególnie w czasie wezbrań (Wyszkowski, Matlak, Grunwald, Stefańczyk 1993)

Ujęcie PU-1 zlokalizowane jest w 510,2 km Wisły poniżej Ujęcia Zasadniczego. PU-1 posiada 7 drenów rozłożonych promieniście. Sumaryczna długość drenów PU-1 wynosi ok. 1131 m z czego 959 m stanowi część perforowana (prawie 85%). Maksymalna wydajność ujęcia PU-1 wynosi $264\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ($11\,000 \text{ m}^3/\text{h}$), zaś przeciętnie około $220\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. Ujęcie PU-2 położone jest w 509,8 kilometrze rzeki powyżej „Grubej Kaśki”. Ujęcie to posiada osiem promieniście położonych drenów o sumarycznej długości 1237 m z czego 1084 m to część perforowana (88%). Średnica drenów w części perforowanej jest stała i wynosi 40 cm. Maksymalna wydajność ujęcia PU-2 wynosi $93\,700 \text{ m}^3/\text{d}$, a średnia zazwyczaj mieści się w zakresie od $30\,000$ do $60\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. Ujęcie PU-3 wybudowane jest w 508,6 km Wisły. Całkowita długość drenów wynosi 1403 m w tym 1216 m w części perforowanej (87%).



Rys. 30 Schemat ułożenia drenów ujęć PU-1 i PU-2

Wydajność maksymalna ujęcia PU-3 wynosi 90 000 m³/d, a wydajność średnia mieści się w zakresie 30 000 – 60 000 m³/d. Ujęcie infiltracyjne PU-4 znajdują się na wysokości 508,2 km Wisły. Posiada ono 8 drenów. Sumaryczna długość drenów ujęcia PU-4 wynosi 1631,5, zaś części perforowanej 1304 m (niemal 80%). Przy wyższych stanach rzeki wydajność maksymalna ujęcia PU-4 może wynieść 90 000 m³/d, średnio mieści się w zakresie 30 000-60 000 m³/d. W przypadku niemal wszystkich ujęć lewobrzeżnych dreny są nachylone pod niewielkim kątem w kierunku ujęć, aby czerpana woda mogła spływać grawitacyjnie. Jedynie dreny nr 1-4 ujęcia PU-4 położone są na stałej wysokości (ok. 72,6 m n.p.m.). Wszystkie dreny



Rys. 31 Schemat ułożenia drenów Ujęć PU-3 i PU-4

ujęć lewobrzeżnych w częściach perforowanych posiadają średnicę wynoszącą 40 cm (na podstawie informacji uzyskanych w MPWiK).

Część drenów ujęć PU-1, 2, 3 i 4 jest położona w strefie tranzytowej koryta przebiegającej zgodnie z linią nurtu rzeki. Są one w związku z tym narażone na intensywną przeróbkę złoża filtracyjnego i częsty spadek jego miąższości. W warunkach największych przepływów miąższość ta spada nawet poniżej 1 m. Problem ten jest najbardziej dotkliwy w przypadku ujęć PU-1 i PU-2, które położone są w strefie płosa, przy brzegu wklęsłym.

Obserwowana współcześnie zmiany reżimu hydrologicznego rzek na Niżu Polskim, w tym także Wisły polegające na powiększaniu się różnic pomiędzy stanami i przepływami ekstremalnymi (min i max) (Blöschl 2017) i dominacją stanów niskich w ciągu roku, a także wzrost zapotrzebowania na wodę w związku z dynamicznym rozwojem aglomeracji warszawskiej, od kilku lat trwają starania nad budową kolejnego ujęcia, które miałyby być ulokowane na lewym brzegu Wisły pomiędzy PU-2, a PU-3. Wskazana lokalizacja przez MPWiK posiada swoje wady i zalety. Niewątpliwą zaletą jest bliskie położenie względem Stacji Pomp Rzecznych wiążące się ze względnie niskimi kosztami budowy i eksploatacji ujęcia i przewodów przesyłowych. Do wad tej lokalizacji należą uwarunkowania geologiczne oraz hydrodynamiczne, które zostaną omówione w dalszej części pracy.

4.4 Obiekty pływające

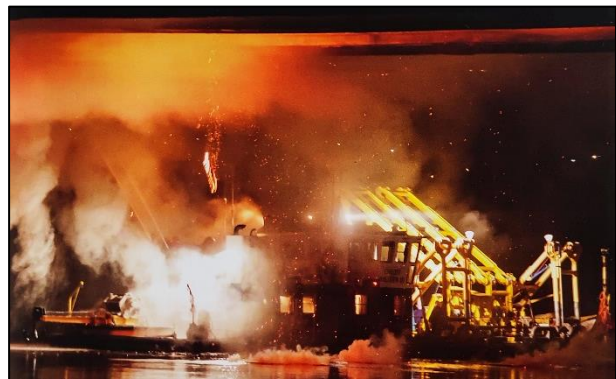
Oprócz wymienionych jednostek przeprowadzających działania w korycie Wisły, spółka MPWiK w Warszawie posiada szereg innych jednostek pływających w postaci barek, kotwiarok, łodzi motorowych oraz łodzi motorowej służącej do koszenia roślinności „Amur” działającej głównie na zbiorniku Czerniakowskim. Spulchniacze hydrauliczne PSH „Chudy Wojtek” nr II (*Fot. 4*) i III (*Fot. 5*) odpowiadają za oczyszczanie, spulchnianie oraz odpowietrzanie złoża nad drenami wszystkich ujęć infiltracyjnych w Warszawie. Chudy Wojtek nr III zazwyczaj pracuje nad ujęciami UU-1, UU-2 oraz PU-3 i PU-4. PSH III posiada własny napęd strugo wodny, w przeciwieństwie do PSH II, który musi być ciągnięty przez holownik. Ze względu na to, iż PSH II pracuje na małym obszarze przy Ujęciu Zasadniczym oraz PU-1 i PU-2, możliwe jest jego przemieszczanie przy wykorzystaniu wind kotwicznych.

Proces dekolmatacji złoża przy zastosowaniu spulchniaczy hydraulicznych polega na jego płukaniu przy różnej głębokości oraz intensywności. Płukanie może odbywać się po kierunku ułożenia drenów lub po całej powierzchni pola drenażowego. Wyróżnia się cztery rodzaje płukania: płukanie powierzchniowe wykonywane bezpośrednio nad całą powierzchnią złoża w odległości ok. 10 cm nad dnem rzeki; płukanie płytkie, wykonywane na głębokości do



Fot. 4 Chudy Wojtek II na tle Ujęcia Zasadniczego – Grubej Kałki (fot. P. Bartold, 2022)

ok. 0,5 m od powierzchni dna rzeki, które powinno być stosowane w sytuacji zatrzymania naturalnej wymienności złoża nad całym polem drenażowym w ciągu jednego dnia; płukanie średnie, eksploatacyjne wykonywane na głębokości do ok. 2 m, mające na celu usunięcie ze złoża zanieczyszczeń oraz powietrza, płukanie głębokie wykonywane do ok. 0,5 m nad drenem w celu usunięcia zanieczyszczeń na drenie i w jego otoczeniu. Najgłębsze płukanie w pobliżu drenu wymaga jego wyłączenia oraz późniejszego odpiaszczenia. Płukanie głębokie stosuje się zwykle po kilku latach eksploatacji drenu. Najczęściej prowadzi się je przy braku poprawy efektywności filtracji po płytszych płukaniach, w przypadku obniżania wydajności, przy jednoczesnym wzroście depresji na drenie (na podstawie informacji uzyskanych podczas stażu w MPWiK od Kapitana Chudego Wojtka III). Do zadań spulchniaczy należy także wykonywanie sondowań miąższości złoża nad drenami. Sondowania wykonywane są raz na tydzień, wyłącznie nad drenami ujęć. Od miąższości złoża uzależniony jest sposób płukania.



Fot. 5 Chudy Wojtek III podczas gaszenia pożaru mostu Łazienkowskiego w nocy z 14 na 15.02.2015 r. (Fot. S. Starnawski)



Fot. 6 Głowica pogłębiarki „SAWA” (fot. D. Kowalczyk, 2016)

Możliwości Chudych Wojtków wykorzystywane są także w sytuacjach kryzysowych w trakcie powodzi oraz w zdarzeniach nieprzewidzianych/nagłych jak np. 15 lutego 2015 roku, gdy załoga PSH III pomagała przy gaszeniu pożaru mostu Łazienkowskiego (Fot. 5).

Zadaniem pogłębiarek ssąco-refulujących „SAWA” (Fot. 6) oraz „ZSRT” jest regulacja przykrycia drenów złożem filtracyjnym, w tym usuwanie przykos oraz wysp piaskowych, udrażnianie przepływu na obszarze czerpania wody oraz dosypywanie złoża w przypadku jego niedostatecznej miąższości. Pogłębiarki mogą być wykorzystywane do wydobywania nadmiaru piasku rzecznoego i transportowania urobku na teren piaskarni ulokowanej koło Ujęcia Zasadniczego (ul. Wał Miedzeszyński 385). SAWA oraz ZSRT wykorzystywane są także przy wymianie drenów metodą odkrywkową. Oba wymienione urządzenia pływające nie posiadają własnego napędu. W rejonie ujęć najczęściej poruszają się przy zastosowaniu wind kotwicznych. Obie pogłębiarki urabiają rumowisko metodą motylkową i bruzdową. Okresowo zadaniem pogłębiarek jest również odpiaszczanie zatok zaprądowych ujęć brzegowych znajdujących się przy Stacji Pomp Rzecznych.

5 METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Realizacja celów rozprawy wymagała kwerendy materiałów archiwalnych, a także przeprowadzenie badań terenowych, laboratoryjnych oraz modelowych.

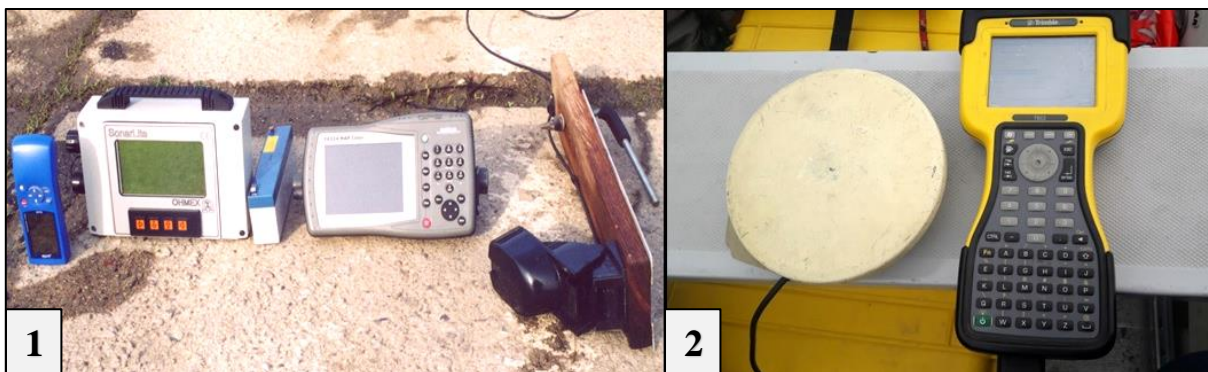
5.1 Badania terenowe

W ramach prac terenowych przeprowadzono badania batymetryczne (echosondaże) w warunkach różnych stanów rzeki, kartowanie geologiczne strefy korytowej obejmujące także wiercenia w korycie wraz z poborem próbek do analiz granulometrycznych, rejestracji morfologii koryta za pomocą zobrażeń uzyskanych w trakcie przelotów bezzałogowym statkiem powietrznym. W celu rozpoznania zasięgu wpływu ujęć infiltracyjnych na dynamikę przepływu wód w aluwialnym poziomie strefy korytowej przeprowadzono pomiary gradientometryczne. Badania terenowe wykonywano w ciągu 5 lat od września 2019 do października 2024 roku.

5.1.1 Pomiary batymetryczne – echosondaże

Ponieważ celem badań było określenie wpływu budowy geologicznej na warunki funkcjonowania ujęć poddennych, kluczowym problemem było określenie morfodynamiki koryta. Podstawą określenia dynamiki zmian rzeźby dna koryta i zróżnicowania prędkości przepływu wód w warunkach różnych stanów były mapy batymetryczne. Opracowano je na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów batymetrycznych.

Do wykonania pomiarów batymetrycznych koryta Wisły wykorzystano zestaw hydrograficzny składający się z widocznej na zdjęciu nr 7 echosondy Ohmex „SonarLite” (Ohmex Ltd., Hampshire, UK) zintegrowanej z odbiornikiem DGPS działającym w trybie RTK (ang. Real-Time Kinematic) i RTN (ang. Real-Time Network). Przetwornik echosondy zainstalowano na 5 metrowej łodzi hybrydowej typu „RIB” o niewielkim zanurzeniu przystosowanej do pracy w środowisku dużych, przeciążonych rumowiskiem, rzek nizinnych o silnym nurcie (*Fot. 8*). Sposób mocowania przetwornika oraz anteny odbiornika GNSS zapewniał wysoką manewrowość w zróżnicowanych warunkach hydrologicznych oraz zminimalizował błędy pomiarowe wynikające z przechyłu łodzi. Echosonda pracowała w zakresie częstotliwości 190–210 KHz i generowała impulsy o prędkości 1470 m/s. Minimalna głębokość koryta pozwalająca na wiarygodny pomiar wynosiła 0,5 m. Głębokości rejestrowane wymienioną echosondą były wielokrotnie weryfikowane z głębokością rzeczywistą określaną przy zastosowaniu sondy geologicznej z możliwością odczytu odległości od rzędnej zwierciadła Wisły do dna koryta. Przy wykonywanych porównaniach mierzonych



Fot. 7 Echosonda OHMEX Sonarlite (1 – fot P.Ostrowski 2018) i odbiornik RTK DGPS Trimble (2 – fot. P.Bartold 2019)

głębokości błąd pomiaru echosondy nie przekraczał 3 cm. Do dokładnego określenia współrzędnych geograficznych oraz rzędnej poszczególnych punktów pomiarowych wykorzystano odbiornik GNSS Trimble TCS2 współpracujący z systemem precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna - EUPOS).

Podczas wykonywanego pomiarów batymetrycznych w pamięci wewnętrznej urządzenia co sekundę zapisywane były punktowe pomiary głębokości oraz kartezjańskie współrzędne (X, Y, Z) każdego punktu pomiarowego. Dane te w postaci chmury punktów stanowiły podstawę do przeprowadzenia interpolacji powierzchni dna koryta na bazie których, w procesie postprocesingu wykonano mapy hipsometryczne oraz modele przestrzenne koryta. Trasę łodzi podczas echosondaży wyznaczano tak, aby punkty pomiarowe były w miarę równomiernie rozmieszczone na całym badanym odcinku. Ponad strefami drenażowymi ujęć infiltracyjnych (miejscami kluczowymi dla niniejszego opracowania) zwiększono zagęszczenie punktów. Terminy wykonywanych w korycie badań były każdorazowo konsultowane



Fot. 8 Łódź pontonowa typu „RIB” z silnikiem spalinowym na tle budynku Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie (fot. P.Bartold 2021)

z odpowiednimi jednostkami Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie za pośrednictwem opiekuna stypendysty.

5.1.2 Kartowanie geologiczne

Szczegółowe określenie budowy geologicznej badanego fragmentu koryta wymagała zarówno wykorzystania archiwalnych opracowań i profili wierceń, ale także wykonania własnych wierceń i kartowania strefy przybrzeżnej. Informacje z wykonanych wierceń pozwoliły na uszczegółowienie obrazu układu wychodni w podłożu aluwiiów na badanym odcinku (por. Falkowski 2006, Falkowski, Ostrowski 2009).

Wiercenia ręczne zostały wykonane zestawem firmy Eijkelkamp. Odwierty wykonywane w korycie rzeki wymagały zastosowania dwóch łodzi pontonowych oraz systemu kotwic pozwalającego na utrzymanie stabilności podczas wykonywania odwiertu. Wykonano 51 otworów wierconych w korycie rzeki (*Zal. 6*). Maksymalna głębokość wyniosła 10,4m. W trakcie budowy przestrzennego modelu koryta przeanalizowano 500 opisów wierceń z CBDG (Centralny Bank Danych Geologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego). Wiercenia te były wykonywane w latach od 1954 do 2018. Najgłębszy otwór archiwalny obejmuje 44,85 m profilu geologicznego strefy w pobliżu ujęcia zasadniczego. Kartowanie geologiczne polegało również na inwentaryzacji w trakcie wizji lokalnych stref pływic i raf kamienistych podczas niskich stanów wody. Uzupełnieniem wierceń oraz materiałów archiwalnych były laboratoryjne analizy uziarnienia utworów aluwialnych, które szczegółowo zostały opisane w podrozdziale 5.2.1.

5.1.3 Przeloty bezzałogowym statkiem powietrznym

W trakcie badań batymetrycznych niezbędnym było precyzyjne określenie położenia linii brzegowej. Określono je w trakcie przelotów bezzałogowym statkiem powietrznym DJI Phantom 3 Professional wyposażonego w kamerę. Przeloty dronem były autonomiczne (*Rys. 32*), zaprogramowane w aplikacji Litchi for DJI Drones (VC Technology Ltd) w wersji 4.26.2 z zachowaniem stałej wysokości (200 oraz 150 metrów) i prędkości przelotu 40 km/h. Dzięki zachowanym stałym warunkom przelotu możliwe było osiągnięcie najwyższej jakości obrazu przy określonej rozdzielczości 3840x2160 i ilości 30 klatek na sekundę. Dodatkowo do nagrań wykorzystano filtr polaryzacyjny CPL (ang. Circular Polarizing Filter) redukujący ilość refleksów na powierzchni zwierciadła wody. Przeloty dronem posłużyły do wykonania



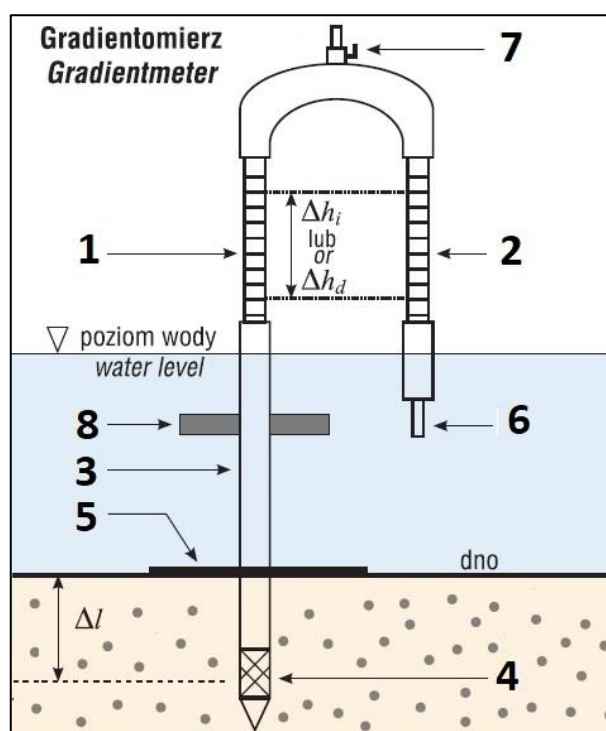
Rys. 32 Ścieżka przelotu autonomicznego w aplikacji Litchi oraz model wykorzystanego drona (DJI Phantom 3).

roboczych ortofotomap przygotowanych w programie Agisoft. Wykonane nagrania, zdjęcia oraz opracowane ortofotomapy pozwoliły na określenie zasięgu rzeki przy danym stanie, a także położenia stref płyczn i stagnacji wód, które nie były dostępne w trakcie badań echosondażowych.

5.1.4 Pomiary gradientomierzem konstrukcji prof. M. Marciniaka

Strefy wpływu ujęć na dynamikę wód podziemnych pośrednio wskazują obszar ich oddziaływania na przebieg kolmatacji i konsolidacji złoża, poprzez zwiększenie skali infiltracji wód powierzchniowych.

W celu rozpoznania zasięgu wpływu ujęć infiltracyjnych na dynamikę wód podziemnych zostały przeprowadzone pomiary z wykorzystaniem gradientomierza konstrukcji prof. dr hab. M. Marciniaka (Rys. 33). Gradientomierz jest urządzeniem stosowanym w badaniach hydrogeologicznych umożliwiającym pomiar gradientu hydraulicznego (różnicy ciśnień) między wodami powierzchniowymi a wodami podziemnymi. Składa się on z dwóch rur, z których jedna umieszczana



Rys. 33 Schemat konstrukcji gradientomierza; 1 – rurka pomiarowa piezometru, 2 – rurka pomiarowa wód powierzchniowych, 3 – piezometr wbijany w osady denne, 4 – filtr, 5 – krążek dociskowy, 6 – wąż zanurzony w wodach powierzchniowych, 7 – zawór, 8 – uchwyt (Marciniak, Chudziak, 2015)

jest w osadach budujących dno koryta, a druga w wodzie powierzchniowej. Dzięki zastosowaniu dwóch rur gradientomierz pozwala na jednoczesne pobieranie wody z dwóch różnych ośrodków. Woda pobrana z koryta rzeki oraz woda z pod jej dna porównywane są pod względem ciśnienia hydrostatycznego. Pomiar ten pozwala ocenić, czy woda z rzeki infiltruje w głąb osadów dennych (infiltracja - Δh_i), czy też odwrotnie, wypływa z warstwy wodonośnej do rzeki (drenaż - Δh_d). Znajomość różnicy ciśnień hydrostatycznych pozwala na obliczenie gradientu hydraulicznego (Marciniak, Chudziak 2015). Badania określania gradientu hydraulicznego zostały wykonane według metodyki opisanej w artykule M. Marciniaka oraz Ł. Chudziaka (2015).



Fot. 9 Autor niniejszej pracy podczas wykonywania badań terenowych z wykorzystaniem gradientomierza, po lewej dr P. Ostrowski (fot. dr F. Bujakowski, wrzesień 2021).

Pomiary gradientomierzem we współpracy z zespołem z Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego (2024) zostały wykonane we wrześniu (Fot. 9), październiku i listopadzie 2021 roku. Wykonano je w 98 punktach linii brzegowej badanego w ramach pracy odcinka z wyłączeniem fragmentu lewego brzegu rzeki znajdującego koło Stacji Pomp Rzecznych. Efektem wspólnie prowadzonych badań jest artykuł złożony do druku (Bujakowski, Falkowski, Krogulec, Bartold, Zabłocki, Trzeciak, Ostrowski, 2024) pod tytułem „Assessing the feature of hyporheic zone on a river section subject to strong anthropopressure using gradientometric and hydroacoustic methods”.

5.2 Badania laboratoryjne – analizy granulometryczne

W celu rozpoznania szczegółowej litologii oraz wodoprzepuszczalności pobranych próbek aluwii zostały wykonane analizy granulometryczne. Próbkę aluwii została pobrana w trakcie wykonywania wierceń w korycie Wisły. Wykorzystano również archiwalne krzywe uziarnienia gruntów pobranych na badanym odcinku rzeki w latach 1991 -1994 (Falkowski i in. 1994).

Skład granulometryczny pobranych próbek został określony zgodnie z zasadami opisanymi w pracy E. Myślińskiej (1992). Rodzaj gruntów oznaczono zgodnie z polską normą PN-86/B-02480. Na podstawie uzyskanych krzywych uziarnienia z przeprowadzonych badań

możliwe było wyznaczenie wartości współczynnika filtracji. Do obliczeń współczynnika filtracji wykorzystano wzór amerykański (Twardowski, Drożdżak 2006).

5.3 Budowa bazy gis i opracowanie wyników

Wyniki badań terenowych oraz laboratoryjnych zostały wprowadzone, do bazy danych utworzonej w programie ArcGIS w wersji 10.8 (ESRI). Program ten składający się z wielu komponentów (m.in. ArcMap, ArcScene) pozwolił na utworzenie map wynikowych przedstawiających morfologię koryta rzeki przy różnych stanach, budowę geologiczną strefy korytovej, położenie stropu utworów trudnorozmywalnych, a także rozkład przestrzenny miąższości aluwioów. Ponadto, przy wykorzystaniu wskazanego programu przygotowano numeryczne modele powierzchni obszaru międzywala wykorzystane przy modelowaniu hydrodynamicznym przepływu w korycie. Program ten umożliwił również przeprowadzenie orientacyjnych obliczeń objętości oraz wykonywanie różnych operacji na uzyskanych mapach rastrowych.



Rys. 34 Fragment roboczej ortofotomapy wykonanej na podstawie zdjęć z 24.09.2022 r. (54 cm – stan średni)

W celu umożliwienia porównywania map rastrowych oraz prowadzenia na nich działań, obszar badań zgeneralizowano do zasięgu rzeki przy najniższym stanie, podczas którego przeprowadzono badania batymetryczne, tj. 50 cm względem zera wodowskazu Warszawa-Bulwary (16.12.19). Dla określenia dokładnego przebiegu linii brzegowej przy określonym poziomie zwierciadła wody wykorzystano roboczą ortofotomapę uzyskaną na podstawie zdjęć wykonanych podczas przelotu dronem z dnia 24.09.2022 r. Stan wody był w tym dniu nieznacznie wyższy i wynosił 54 cm. Różnicę tę pominięto. Ortofotomapę wykonano w programie Agisoft (Rys. 34).

Wszystkie przygotowywane mapy rastrowe posiadają jednakową liczbę kwadratowych bloków obliczeniowych. Ze względu na możliwość zastosowania komputera o wysokiej mocy obliczeniowej oraz ze względu na stosunkowo niewielki obszar badań o powierzchni mniejszej niż 1km^2 (dokładnie $784\ 104\ \text{m}^2$), wykorzystano najmniejszy możliwy krok dyskretyzacji obszaru badań. Wielkość komórek wynosiła 1m^2 ($1\times 1\text{m}$). Obszar badań został zatem podzielony na 784 104 bloków obliczeniowych o jednakowej wielkości. Użycie najmniejszego rozmiaru bloków obliczeniowych możliwego do wykorzystania w programie ArcMap,

pozwoiliło na wygenerowanie map rastrowych o najwyższej do uzyskania dokładności i jakości obrazu.

W utworzonej GIS-owej bazie danych wykorzystano układ współrzędnych ETRS 1989 Poland CS92 (*ang. European Terrestrial Reference System 1989*), zapewniając zgodność z europejskim systemem odniesienia oraz precyzyjne odwzorowanie przestrzenne. Poland CS92 (*ang. Coordination System 1992*) to układ geodezyjny, który wykorzystuje odwzorowanie Gaussa-Krügera i służy do precyzyjnych pomiarów geodezyjnych oraz mapowania w skali kraju. Wymieniony układ współrzędnych jest obecnie podstawowym wykorzystywanym w Polsce do m.in. map topograficznych oraz katastralnych. Wszystkie wykonane mapy oraz opracowania przestrzenne zostały osadzone w opisanym układzie.

5.3.1 Morfologia dna – mapy hipsometryczne

Przygotowanie map hipsometrycznych rozpoczęto od obróbki surowych danych wygenerowanych z echosondy jednozakresowej SonarLite. Zebrane podczas każdego z czterech sesji pomiarów batymetrycznych dane wyjściowe zostały wstępnie przeniesione do arkusza kalkulacyjnego w którym zmieniono format pliku na odpowiedni (.csv), możliwy do odczytania przez program ArcMap. Dane wprowadzone do programu zostały zamienione na warstwę wektorową w postaci chmury punktów o określonych współrzędnych geograficznych. Każdy punkt pomiarowy zaimplementowany do bazy danych oprócz współrzędnych geograficznych (X, Y) posiadał informacje dotyczące wysokości zwierciadła wody względem poziomu morza (Z), głębokość do dna (H) wyrażoną w metrach oraz czas pomiaru z dokładnością do jednej sekundy. Wartości rzędnych dna (R) zostały obliczone w wyniku odejmowania głębokości dna od wysokości zwierciadła wody.

Ze względu na zastosowaną metodykę pomiarów batymetrycznych, część danych mogła zostać uzyskana w niekorzystnych warunkach atmosferycznych, zniekształcona przez czynniki zewnętrzne lub obciążona innymi błędami. Wśród czynników zewnętrznych mających wpływ na wyniki pomiarów określono obecność wysokich fal na Wiśle, bliskość dużych konstrukcji takich jak mosty (Łazienkowski, Siekierkowski), występowanie obiektów pływających w wodzie lub leżących na dnie rzeki, a także płytkie położenie przewodów telekomunikacyjnych, energetycznych lub wodociągowych. Dodatkowo podczas badań terenowych z wykorzystaniem odbiornika RTK DGPS, przeprowadzonych po rozpoczęciu wojny na Ukrainie (24.02.2022 r.), zaobserwowano chwilowe zakłócenia sygnału satelitarnego.

Umieszczone w programie dane zostały szczegółowo przeanalizowane w celu wybrania jedynie poprawnych danych niepowodujących zniekształcenia map wynikowych.

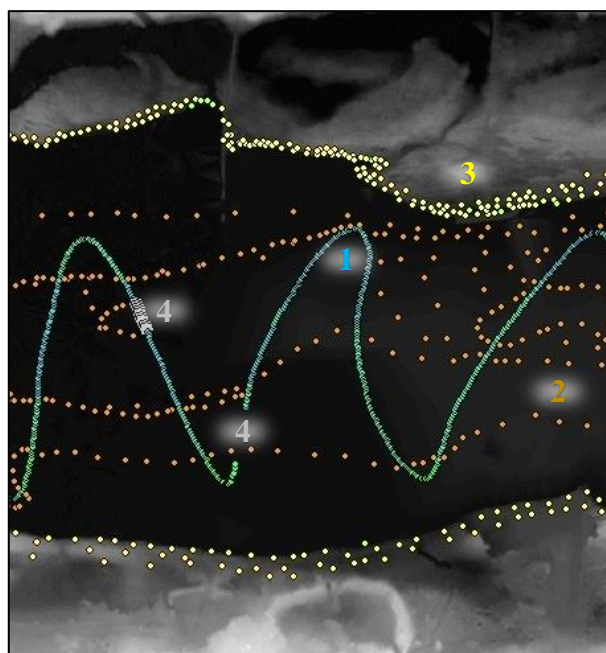
W szczególności poddano dogłębnej analizie rzędna zwierciadła wody oraz głębokość do dna. Punkty o skrajnych wartościach, obciążonych błędem grubym zostały odrzucone z puli wykorzystanych do dalszych działań. Ponadto, usunięto również punkty tzw. odstające (*Rys. 35 – 4*), których wartości mieściły się w zakresie większości wykorzystanych danych (95%), ale ich wielkość różniła się znacząco od punktów najbliższej leżących na ścieżce echosondażu. Odrzucenie wartości odstających było szczególnie istotne przy wykorzystanej metodzie interpolacji.

Wyselekcjonowane punkty pomiarowe posłużyły do wykonania map hipsometrycznych dna badanego odcinka rzeki dla każdego z 4 badań batymetrycznych. W celu wykonania dokładnych obrazów odzwierciedlających naturalny kształt dna z zachowaniem struktur korytowych, konieczne było dobranie odpowiedniej metody interpolacji, dopasowanej do m.in. wielkości obszaru badań, położenia punktów pomiarowych oraz ich zagęszczenia. Wstępnie wykonywano próby interpolacji wszystkimi dostępnymi metodami w ArcMap czyli: IDW (Inverse Distance Weighting), Kriging, Spline, Topo to raster oraz Natural Neighbor. Najlepsze efekty interpolacji zdecydowanie uzyskiwano przy wykorzystaniu metody Spline.

Metoda interpolacji typu Spline szacuje wartości za pomocą funkcji matematycznej minimalizującej ogólną krzywiznę powierzchni, co skutkuje uzyskaniem wygładzonej jej struktury przechodzącej dokładnie przez punkty wejściowe (*Rys. 36*). Pisząc bardziej obrazowo, metoda ta działa jak elastyczna membrana, która wygina się, aby przejść przez punkty o określonych wartościach, jednocześnie wygładzając interpolowaną powierzchnię. Efekt rozciągniętej membrany pozwala na uzyskanie na wyinterpolowanej powierzchni wartości ekstremalnych znajdujących się poza zakresem wykorzystanych danych wejściowych. Wybrana metoda jest przeznaczona do tworzenia płynnie zmieniających się powierzchni, takich jak ukształtowanie terenu, poziomy wód gruntowych czy rozkłady stężeń zanieczyszczeń.

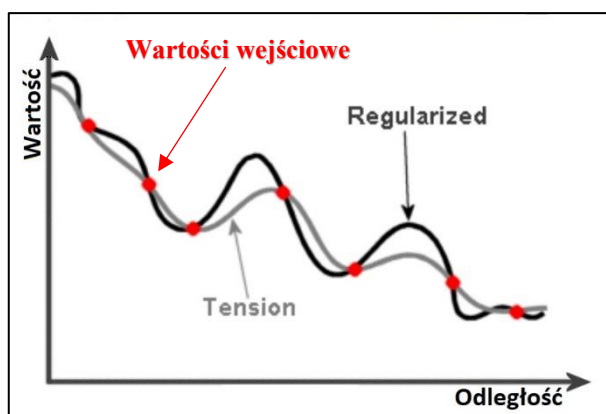
Istnieją dwa warianty metody Spline: zregularyzowana (ang. regularized) oraz napięciowa (ang. tension). Wersja zregularyzowana tworzy gładką, stopniowo zmieniającą się powierzchnię, której wartości mogą znacząco wykraczać poza zakres danych próbnych. W obliczeniach uwzględnia się pierwszą pochodną (nachylenie), drugą pochodną (tempo zmiany nachylenia) oraz trzecią pochodną (tempo zmiany drugiej pochodnej). Metoda napięciowa wykorzystuje jedynie pierwszą i drugą pochodną, ale uwzględnia więcej punktów w obliczeniach Spline. Zazwyczaj tworzy to gładzsze powierzchnie, jednak kosztem wydłużenia czasu obliczeń. Ta metoda „napina” powierzchnię nad punktami, co daje efekt rozciągnięcia (esri.com).

Ze względu na wykorzystaną metodykę pomiarów batymetrycznych i możliwość nienatrafienia na faktyczne wartości maksymalne i minimalne rzędnych dna podczas badań, uzyskanie wymodelowanych wartości skrajnych na utworzonych powierzchniach dna jest dodatkową zaletą wybranej metody interpolacji. W celu minimalizacji wyinterpolowanych wartości ekstremalnych i zmaksymalizowania wygładzenia modelowanej powierzchni dna rzeki wybrano wersję „tension” – napięciową (Rys. 36). Wadą wykorzystanej metody Spline jest możliwość zaistnienia na utworzonych powierzchniach tzw. artefaktów graficznych (błędów interpolacji) w miejscach o dużym zagęszczeniu punktów pomiarowych znacząco różniących się wartościami. W związku z tym konieczne była szczegółowa analiza wartości występujących na ścieżce echosondażu i odrzucenie punktów odstających.



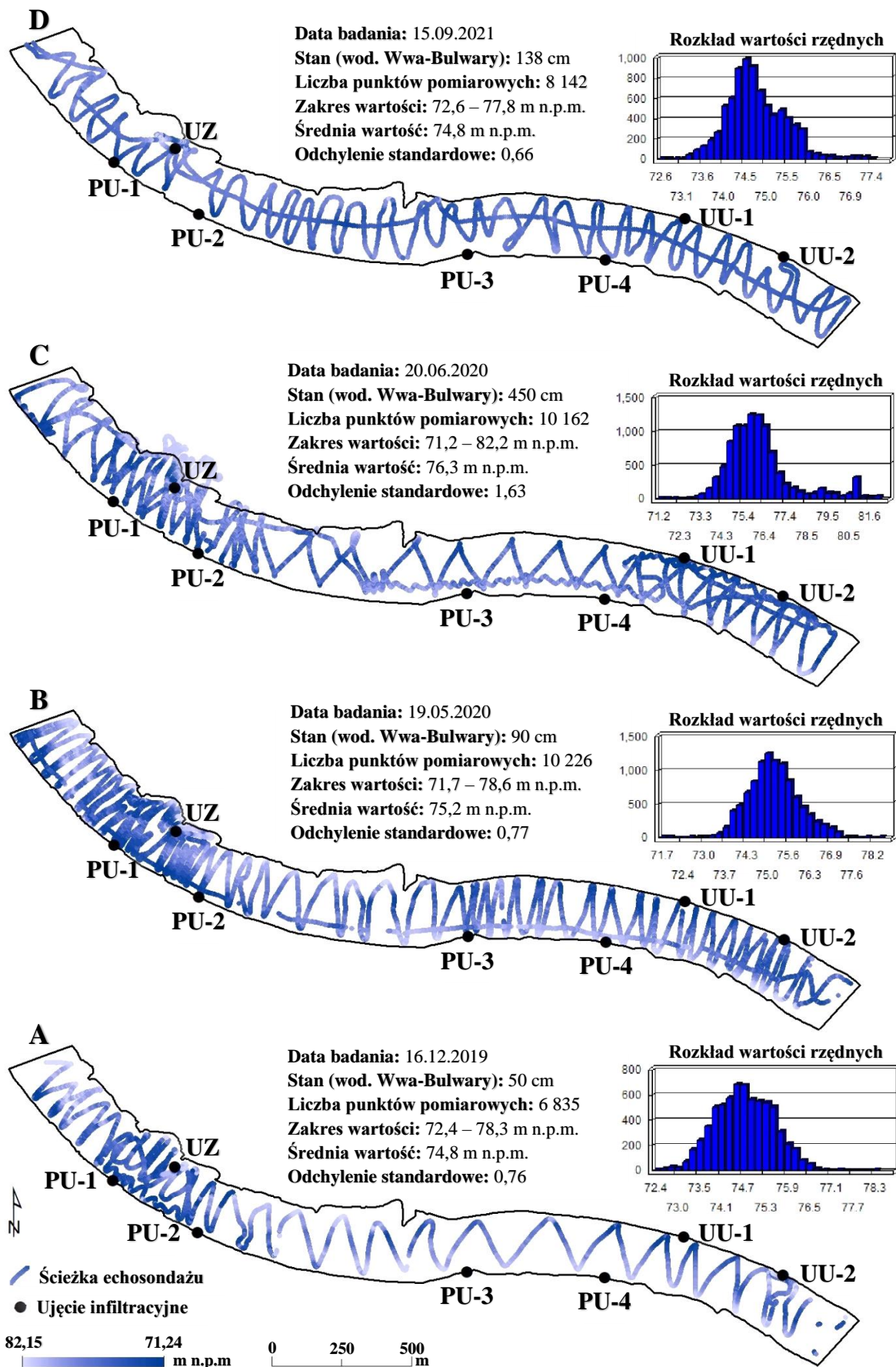
Rys. 35 Przykład fragmentu chmury punktów wykorzystanych do utworzenia mapy hipsometrycznej
1 – punkty z echosondażu, 2 – punkty pomocnicze,
3 – punkty brzegowe, 4 – usunięte punkty odstające

Po wyeliminowaniu wartości skrajnych oraz odstających, ilość punktów pomiarowych wchodzących w skład ścieżek wykonanych badań batymetrycznych, mieścił się w zakresie od 6835 do 10226 (Rys. 37). Pomierzony zakres zbadanych wartości średnich rzędnych dna wyniósł od 74,8 do 76,3 m n.p.m. Wartości minimalne (71,2 m n.p.m.) oraz maksymalne (82,2



Rys. 36 Schemat działania metody interpolacji typu Spline w wersji Regularized oraz Tension

m n.p.m.) rzędnych dna określono przy stanie najwyższym (450 cm), podczas przejścia fali wezbraniowej dnia 20.06.2020 r. Wówczas określono również najwyższe zróżnicowanie wartości charakteryzujące się odchyleniem standardowym wynoszącym 1,63. Najmniejszy rozrzut wartości wokół średniej wynoszący 0,76 odnotowano przy stanie najniższym (50 cm) podczas badania wykonanego 16.12.2019 r. Rozkłady wartości rzędnych dna dla badań (A, B,



Rys. 37 „Chmury” punktów pomiarów batymetrycznych (ścieżki echosondaży)

i D) mają podobną strukturę, z największą koncentracją wyników wokół średniej, jednak w czerwcu 2020 roku (C) rozkład jest bardziej zróżnicowany, co wynika m.in. z wykonania części pomiarów na tarasie zalewowym poza wytyczonym obszarem badań np. koło Ujęcia Zasadniczego. Zmiany w profilach dna są ściśle związane ze stanem wody. Przy niskim stanie wody stwierdzony profil dna przy wykorzystaniu echosondy jest bardziej stabilny i mniej zróżnicowany, natomiast przy wyższym stanie wody (C - czerwiec 2020) dochodzi do większych zmian, co sugeruje większą aktywność erozyjną i sedymentacyjną przy znacznym zwiększeniu przepływu.

Przedstawione chmury punktów na *Rys. 37* przypominające kształtem zygzaki zostały wykorzystane do przygotowania map hipsometrycznych przy zastosowaniu opisanej metody interpolacji. Ze względu na zróżnicowane zagęszczenie punktów pomiarowych jakość pierwszych uzyskiwanych modeli powierzchni dna nie była satysfakcjonująca. Problematyczne okazały się miejsca w których brakowało punktów pomiarowych, głównie przy strefach przybrzeżnych. W tych fragmentach, najczęściej występujących pomiędzy ramionami ścieżki echosondażu, pojawiały się trójkątne formy (artefakty) dopasowujące się kształtem do jej przebiegu, nie przypominając naturalnych struktur korytowych ani łagodnie nachylonych brzegów rzeki. W celu zniwelowania powstałych zniekształceń konieczne było zagęszczenie zbioru danych poprzez dodanie punktów brzegowych oraz pomocniczych (*Rys. 35*).

Wartości wysokości punktów brzegowych, utworzonych w postaci wektorowej, zostały odczytane z numerycznego modelu terenu (pobranego ze strony geoportal.gov.pl) za pomocą narzędzia „Extract values to points” i dodane do zestawu punktów uwzględnionych w interpolacji. Dodanie jedynie punktów brzegowych nie rozwiązywało w pełni problemu pojawiających się artefaktów w miejscach o zbyt małym zagęszczeniu punktów pomiarowych. Dlatego niezbędne było wprowadzenie punktów pomocniczych, których zadaniem było „wypłaszczenie membrany” modelu w miejscach, gdzie wyinterpolowane wartości ekstremalne znacząco przekraczały zakres danych wejściowych. Przyjęte wartości punktów pomocniczych mieściły się w zakresie wartości punktów położonych najbliżej na ścieżce echosondażu. Wykorzystanie zestawu punktów z echosondażu, punktów brzegowych oraz pomocniczych umożliwiło uzyskanie najlepszych odwzorowań dna rzeki wraz z jej brzegami, w jakości pozwalającej na przedstawienie ciągłości podłużnych form korytowych, które można zaobserwować podczas niskich stanów wody, na przykład z lotu drona. Cztery modele powierzchni dna analizowanego odcinka Wisły zostały zaprezentowane łącznie w formie barwnych map hipsometrycznych na *Rys. 39*, a także pojedynczo, w większym formacie,

w załącznikach nr 2, 3, 4 i 5. W załącznikach tych zamieszczono również opisy danych statystycznych dotyczących rozkładu wartości.

Wykonane mapy hipsometryczne (Rys. 39) przedstawiają ukształtowanie dna rzeki w różnych stanach wody: A i B – stan niski, C – stan wysoki oraz D – stan średni. Na wszystkich czterech mapach przebieg osi nurtu jest niemal identyczny. Oś nurtu na tym odcinku Wisły wykazuje typowe zachowanie dla rzek meandrujących – przesuwa się w stronę zewnętrznych części zakoli, tworząc w tych miejscach zagłębienia (ryny). Początkowo oś nurtu biegnie po prawej stronie rzeki od mostu Siekierkowskiego, a następnie przemieszcza się na lewą stronę w rejonie ostrogi zlokalizowanej w centralnej części obszaru, aż do mostu Łazienkowskiego. Przy wysokim stanie wody można zaobserwować lekkie wyprostowanie przebiegu głównego nurtu. Niezależnie od poziomu wody, najgłębsze miejsca na analizowanym fragmencie Wisły występują w rynnach (I i II), usytuowanych wzdłuż umocnionych brzegów. Duże głębokości obserwuje się również w pobliżu Ujęcia Zasadniczego, zwłaszcza przy niskich stanach wody. Najwyższe rzędne w analizowanym korycie zlokalizowane są głównie wzdłuż brzegów rzeki po przeciwnych stronach rynien I i II, jak również w strefach przy ostrogach. Powierzchnia dna rzeki jest najbardziej wyrównana i gładka przy niskich stanach wody (A i B). Natomiast przy wysokim (C) stanie widoczne jest największe zróżnicowanie morfologii dna.

Zakres średnich wartości rzędnej dna dla czterech wykonanych map hipsometrycznych wyniósł od 75,1 do 76,4 m n.p.m. Dla najniższych badanych stanów i przepływów (A: 50 cm, 250 m³/s) średnia wartość rzędnej wynosiła 75,2 m n.p.m., natomiast dla najwyższych (C: 450 cm, 2520 m³/s) były to 76,4 m n.p.m., co stanowi najwyższą średnią wartość. Najniższą średnią wysokość powierzchni koryta (75,1 m n.p.m.) stwierdzono przy stanie średnim (D: 90 cm, 380 m³/s). Minimalną wartość rzędnej dna (71,2 m n.p.m.) oraz maksymalną (82,8 m n.p.m.) określono, podobnie jak w przypadku ścieżek echosondaży, dla najwyższego stanu wody (C). Różnica wartości najwyższej i najniższej średniej wysokości dna wynosi blisko 1,3 metra. Odchylenia standardowe wartości na mapach hipsometrycznych, wynoszące od 1,13 do 1,57, są wyższe od odchyłeń standardowych zarejestrowanych na ścieżkach echosondaży, co wynika z braku przeprowadzenia pomiarów w strefach przybrzeżnych o głębokości poniżej 0,5 metra. Najwyższe odchylenie standardowe (1,57) odnotowano dla rozkładu wartości wysokości na mapie hipsometrycznej przy najwyższym stanie (C), co potwierdza największe zróżnicowanie rzędnych dna dla tego stanu.

Na podstawie powyższych map batymetrycznych wykonanych dla różnych stanów rzeki największe zmiany morfologii koryta można zauważyć w strefach przybrzeżnych po

przeciwnej stronie rynien, szczególnie w okolicach ujęcia zasadniczego oraz w pobliżu mostu Łazienkowskiego po prawej stronie rzeki. Przy stanie wysokim (C) można także zauważyć podniesienie dna w części środkowej koryta głównie w strefie przed i za Ujęciem Zasadniczym. Przy stanach niskich poza zmianami w wymienionych fragmentach koryta zauważalne jest obniżanie się dna w pobliżu mostu Siekierkowskiego.

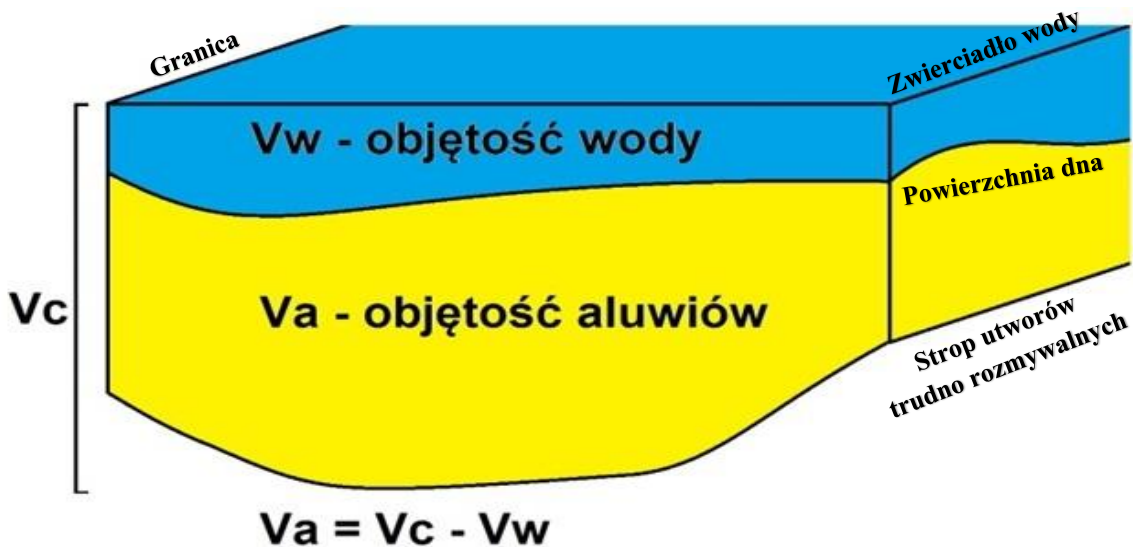
5.3.2 Wykonanie przestrzennego modelu budowy geologicznej oraz powierzchni stropu utworów trudno rozmywalnych

Modele budowy geologicznej oraz powierzchni stropowej utworów trudno rozmywalnych zostały przygotowane w programie ArcMap z wykorzystaniem metody interpolacji typu Spline w wersji „tension” identycznie jak w przypadku map hipsometrycznych dna rzeki z zachowaną tą samą liczbą (784 104) i wielkością bloków obliczeniowych (1x1m). Do interpolacji wykorzystano chmurę punktów, która stanowiła sumę 287 wierceń archiwalnych oraz 51 wierceń ręcznych, co dało łącznie 338 punktów. W celu wykonania wymienionych trójwymiarowych modeli, dla każdego punktu określono co metr głębokości rodzaj utworów geologicznych występujących w danym miejscu na określonej wysokości. Rozpoznanie budowy geologicznej zostało przeprowadzone w zakresie rzędnych od 60 do 75 m n.p.m.

Utwory geologiczne zostały zgeneralizowane do dwóch rodzajów: aluwiów korytowych oraz utworów trudno rozmywalnych. Aby tego dokonać niezbędnym było zweryfikowanie danych z kart otworów wierceń, zdigitalizowanie i wprowadzenie ich do bazy danych programu ArcMap. Uzupełnienie danych w każdym punkcie pozwoliło na zobrazowanie budowy geologicznej w formie map ścienia poziomowego przedstawionych w niniejszej pracy w formie załączników nr 8, 9, 10 a także było konieczne do przygotowania modelu przestrzennego powierzchni stropowej utworów trudno rozmywalnych (*Zał. 7*). Omawiany model przestrzenny został zwizualizowany trójwymiarowo w programie ArcScene.

5.3.3 Określenie miąższości i objętości aluwiów

Na podstawie map hipsometrycznych oraz wygenerowanym w bazie GIS obrazem powierzchni stropowej utworów trudno rozmywalnych zostały określone miąższości aluwiów w warunkach różnych stanów rzeki. Wartości te są wynikiem odejmowania wartości wymienionych map przy zastosowaniu narzędzia tzw. kalkulatora rastrów w ArcMap. Utworzone cztery mapy miąższości dla różnych stanów wody zostały przedstawione w części wynikowej niniejszego opracowania (*Rys. 42*).



Rys. 38 Schemat obliczeń objętości aluwionów

Kalkulator rastrów posłużył także do przeprowadzenia porównania wykonanych map miąższości najmniej oddalonych czasowo (45 dni) z maja (B) oraz z czerwca (C) 2020 r. W wyniku odejmowania wartości mapy czerwcowej od majowej uzyskano mapę różnic miąższości pokazującą zmiany jakie zaszły w morfologii dna badanego odcinka rzeki w okresie obejmującym wezbranie.

Mapy miąższości, zostały wykorzystane także do obliczenia orientacyjnych objętości złoża filtracyjnego na analizowanym odcinku koryta według powyższego schematu (Rys. 38). Objętości aluwionów zostały policzone wykorzystując narzędzie „Volume” w programie ArcMap. Do obliczeń zostały użyte dane w postaci powierzchni dna, wartości rzędnej zwierciadła wody przy danym stanie oraz granicy obszaru rzeki w formie wektorowej. Aby określić objętość aluwionów V_a należało najpierw obliczyć kubaturę całego koryta V_c przy danym poziomie zwierciadła i odjąć od niej objętość wody V_w . W celu umożliwienia wykonania porównania różnic miąższości przy zmianie stanu, granicą określanych objętości były pionowe ściany utworzone prostopadłe do granicy rzeki przy stanie najniższym (50 cm – 16.12.2019).

5.3.4 Ustalenie zasięgu oddziaływania ujęć infiltracyjnych na złoża aluwialne

W celu wykonania mapy pokazującej powierzchniowy rozkład gradientu hydraulicznego zostały wykorzystane dane uzyskane podczas badań terenowych wykonanych przy zastosowaniu gradientomierza. Określone wyniki badań z 87 punktów pomiarowych zostały wprowadzone do bazy danych programu ArcMap. Każdy wprowadzony punkt posiadał informacje dotyczące różnicy ciśnień hydrostatycznych (Δh), głębokości wbicia

gradientomierza (Δl), a także wyznaczone współrzędne geograficzne. Wartości gradientu obliczono z ilorazu $i = \Delta h / \Delta l$

Gradient hydrauliczny (i) oblicza się, dzieląc różnicę ciśnień (Δh) przez wartość głębokości wbicia gradientomierza w osady denne (Δl). Wartości ujemne gradientu hydraulicznego oznaczają infiltrację (downwelling), natomiast wartości dodatnie drenaż (upwelling).

Obliczone wartości gradientu hydraulicznego we wszystkich punktach pomiarowych posłużyły do przeprowadzenia interpolacji przy zastosowaniu metody Spline w wersji „tension”, podobnie jak przy poprzednich analizach dotyczących morfologii dna rzeki oraz budowy geologicznej. Odmienne od poprzedniego sposobu przygotowywania map przy wykorzystanej metodzie interpolacji zwiększono rozmiar bloków obliczeniowych do wielkości 10x10 m. Zwiększenie kroku dyskretyzacji badanego obszaru z 1 m na 10 m było uwarunkowane niewielkim zagęszczeniem punktów pomiarowych w jego obrębie (87 punktów na 0,78 km², tj. 0,01 punktów na 100 m²).

Przed wykonaniem interpolacji przestrzennej wartości gradientu hydraulicznego, wszystkie wprowadzone dane zostały poddane szczegółowej analizie. Wśród punktów pomiarowych wprowadzonych do bazy danych różnica ciśnień hydrostatycznych wynosiła od -59 do 33 cm. Wartości ujemne oznaczają mniejsze ciśnienie wód podziemnych względem wód powierzchniowych w danym miejscu. Zmianę z typowego charakteru drenującego rzeki na charakter infiltracyjny było cechą populacji stanowiącej 24% (21 z 87). Średnia wartość różnicy między wysokościami hydraulicznymi wyniosła 4,2 cm.

Głębokość wbicia gradientomierza mieściła się w zakresie od 20 do 80 cm. Na podstawie uwzględnionych informacji zakres obliczonych wartości gradientu hydraulicznego określono na -0,72 – 1,15. Ujemne wartości gradientu hydraulicznego oznaczają występowanie infiltracji, zaś dodatnie drenażu. Średnią wartość tego parametru określono na poziomie 0,18. W punktach pomiarowych odchylenie standardowe wartości gradientu hydraulicznego ustalono na poziomie 0,4.

Lokalizacja punktów pomiarowych wraz z danymi statystycznymi dotyczącymi wyników pomiarów została przedstawiona na mapie dokumentacyjnej formie załącznika nr 12 oraz w tabeli w załączniku nr 18.

5.3.5 Uzyskanie rozkładu prędkości przepływu wody w korycie – modele 2D

Modele rozkładu prędkości przepływu wody w korycie rzeki odgrywają kluczową rolę w analizie i zarządzaniu wodami rzecznyymi. Pozwalają na zrozumienie dynamiki przepływu,

co jest istotne w kontekście ochrony środowiska, planowania przestrzennego oraz inżynierii hydrotechnicznej. Rozkład prędkości przepływu wody uwarunkowany jest wieloma czynnikami, głównie geometrią koryta, jego nachyleniem, obecnością obiektów hydrotechnicznych, rodzajem podłoża w tym obecnością kulminacji utworów trudno rozmywalnych. Ponadto prędkość przepływu wody w rzece uzależniona jest od warunków hydrologicznych, wysokości zwierciadła wody w rzece, jej temperatury oraz obecności naturalnych lub antropogenicznych przeszkód. Dla niniejszego opracowania modele rozkładu prędkości przepływu wody w korycie są kluczowe dla identyfikacji obszarów stagnacji, gdzie prędkość wody nie przekracza 0,1 m/s oraz fragmentów koryta zagrożonych wzmożoną erozją denną, gdzie prędkość przekracza 1 m/s.

Aby wykonać dwuwymiarowe zobrazowania przepływu wody na badanym odcinku rzeki, konieczne było określenie geometrii koryta oraz obszaru międzywala. W tym celu wykorzystano scalone mapy hipsometryczne z numerycznym modelem terenu otaczającego rzekę. Na podstawie opracowanych powierzchni obszaru międzywala dla czterech różnych stanów i przepływów wykonano dwuwymiarowe modele hydrodynamiczne przy użyciu programu HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) w wersji 6.3.1. Spadek rzeki, przyjęty do obliczeń w modelach hydrodynamicznych, wyniósł 0,00078. Do wyznaczenia prędkości przepływu zastosowano współczynnik szorstkości (n) o wartości 0,040, zgodny z wytycznymi dla dużych rzek (Chow, 1959).

Do wykonania modeli przepływu w programie wykorzystano jedną z trzech dostępnych metod modelowania hydrodynamicznego, znaną jako metoda fal dyfuzyjnych (Diffusion Wave). Ta metoda umożliwia symulację przepływu wód w korytach rzek, uwzględniając różne czynniki, takie jak topografia terenu, geometria koryta oraz zmienne warunki hydrologiczne. Stosuje się ją do analizy i modelowania przepływów w rzekach, kanałach i innych zbiornikach wodnych, co obejmuje zarówno symulacje przepływów laminarno-turbulentnych, jak i analizy stanów wód w czasie rzeczywistym. Zaletami metody są jej prostota w użytkowaniu oraz umiejętność radzenia sobie z różnorodnymi warunkami brzegowymi. Jest szczególnie przydatna w analizach powodziowych oraz w planowaniu zarządzania wodami. Metoda fal dyfuzyjnych posiada również pewne ograniczenia. Nie uwzględnia złożonych zjawisk turbulencji ani interakcji między falami, co może stwarzać trudności w określonych warunkach. Dodatkowo, aby uzyskać precyzyjne wyniki, konieczne jest dostarczenie odpowiednich danych wejściowych.

Dla weryfikacji poprawności modeli przepływu wody w korycie, w programie HEC-RAS przygotowano mapy batymetryczne. Do ich wykonania wykorzystano te same dane, które posłużyły do opracowania map rozkładu prędkości przepływu. Zasięg oraz powierzchnię rzeki, wyznaczone na podstawie mapy batymetrycznej dla najniższego poziomu wody (50 cm), porównano z granicami rzeki zarejestrowanymi za pomocą nagrań wykonanych przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego (drona) przy stanie 54 cm względem zera wodowskazu Warszawa- Bulwary. Porównanie to pozwoliło ocenić zgodność modelu z rzeczywistym przebiegiem koryta rzeki.

5.3.6 Określenie rozkładu prędkości przepływu wody nad kulminacjami utworów trudno rozmywalnych – model 3D

Na wybranym fragmencie analizowanego obszaru w pobliżu ujęcia UU-1, występuje wyraźny garb zbudowany z utworów trudno rozmywalnych. Celem hydrodynamicznego modelowania 3D było określenie wpływu naturalnej przeszkody w postaci tego garbu na zmianę rozkładu prędkości płynącej wody i porównanie go z wynikami modelowania 2D.

Dla niewielkiego wybranego wycinka badanego obszaru przeprowadzono modelowanie trójwymiarowe hydraulicznych warunków przepływu metodą CFD (Computational Fluid Dynamics). Do modelowania wykorzystano pakiet programów ANSYS. Do rozwiązań hydraulicznych zastosowano solver FLUENT. Użyto model VOF (ang. Volume of Fluid), wykorzystywany w analizach przepływów wielofazowych (Johnson, 2016). Model przepływów dwufazowych VOF wykorzystano do obliczeń układu zwierciadła oraz rozkładu prędkości. Dodatkowo ze względu na formę przepływu (ruch burzliwy) zastosowano model przepływu turbulentnego (Goldschmit, Cavaliere, 1997). Do przeprowadzenia trójwymiarowego modelowania hydraulicznych warunków przepływu niezbędna była zamiana rastrowego, numerycznego modelu terenu koryta wraz z otoczeniem na format – STL (ang. stereolithography – format powszechnie używany na potrzeby wydruków 3D oraz projektowania wspomaganego komputerowo) odczytywalny dla programu ANSYS. Zamiana formatu została przeprowadzona za pomocą wtyczki DEMto3D w programie QGIS w wersji 3.20.3.

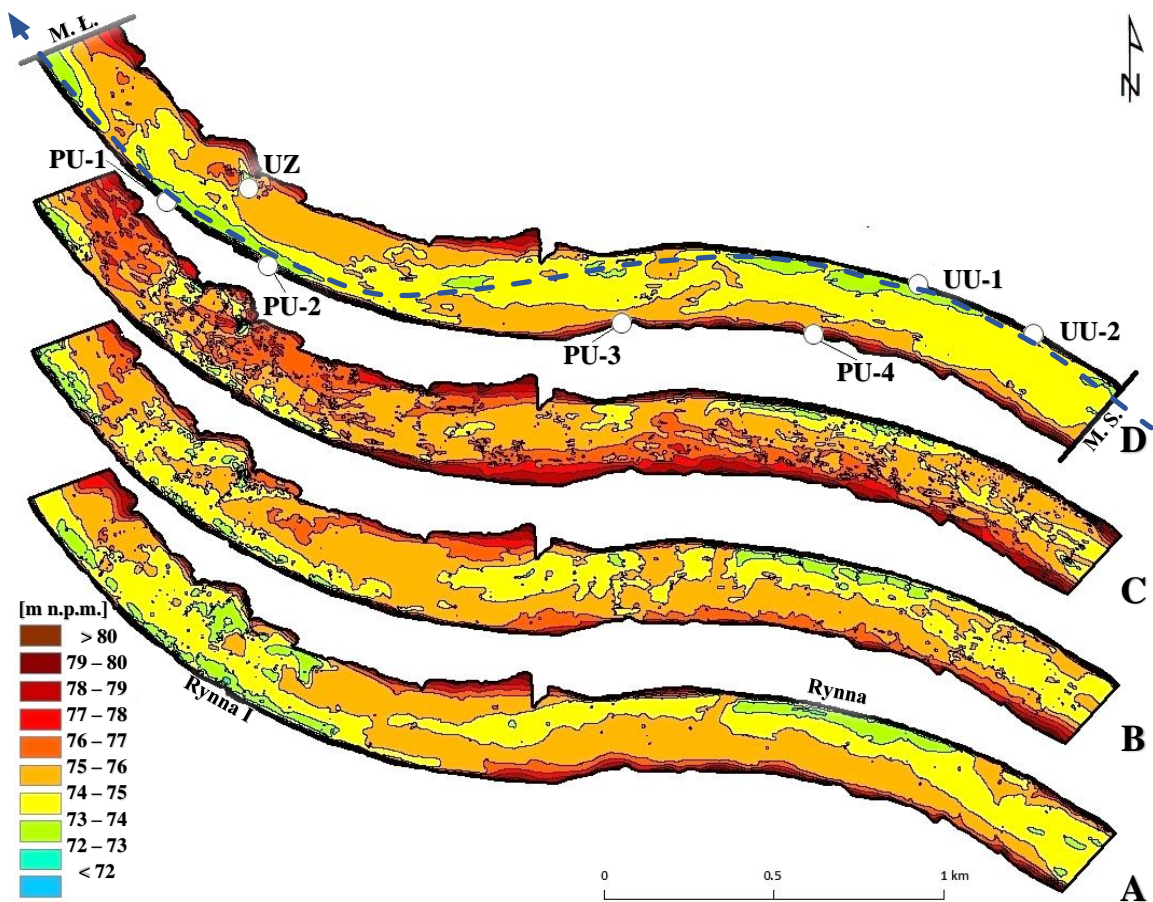
6 WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki badań opisano w czterech podrozdziałach omawiających ukształtowanie powierzchni dna, budowę geologiczną, rozkład prędkości wody w korycie oraz wpływ ujęć na dynamikę wód podziemnych.

6.1 Morfologia koryta

Cztery mapy hipsometryczne obrazujące ukształtowanie dna Wisły dla różnych stanów wody zostały przedstawione zbiorczo na Rys. 39 oraz pojedynczo, w większym formacie, na załącznikach nr 4, 5, 6 i 7. W załącznikach tych zamieszczono również szczegółowe opisy statystyczne, dotyczące rozkładu wartości wysokościowych na każdej z map. Przedstawione mapy hipsometryczne ilustrują kształt dna koryta rzeki w różnych warunkach hydrologicznych: A i B przedstawiają niski stan wody, C – wysoki stan wody, a D – stan średni.

Na wszystkich czterech mapach (Rys. 39) przebieg osi nurtu jest niemal identyczny. Oś nurtu na tym odcinku Wisły wykazuje typowe zachowanie dla rzek meandrujących – przesuwa się w stronę zewnętrznych części zakoli, tworząc w tych miejscach zagłębienia (rynny). Początkowo, od mostu Siekierkowskiego oś nurtu rzeki przebiega blisko prawego brzegu. Na



Rys. 39 Mapy hipsometryczne dna (linia przerywaną zaznaczono zgeneralizowany przebieg linii nurtu)

kolejnej mapie widać, że nurt przesunął się w kierunku lewego brzegu, w okolice ostrogi znajdującej się w centralnej części tego odcinka. Obraz kolejnej mapy dowodzi, że oś nurtu biegnie przy lewym brzegu aż do mostu Łazienkowskiego. W warunkach wysokiego stanu rzeki linia głównego nurtu lekko wyprostowuje się.

Niezależnie od poziomu wody, najgłębsze miejsca na analizowanym fragmencie koryta Wisły występują w rynnach (I i II), usytuowanych wzdłuż umocnionych brzegów (*Rys. 39*). Znaczne głębokości obserwuje się również w pobliżu Ujęcia Zasadniczego, zwłaszcza przy niskich stanach wody. Najwyższe rzędne w analizowanym fragmencie koryta zlokalizowane są głównie wzdłuż brzegów rzeki po przeciwnych stronach rynien I i II, jak również w strefach przy ostrogach. Powierzchnia dna rzeki jest najbardziej wyrównana i gładka przy niskich stanach wody (A i B). Natomiast przy wysokim (C) stanie widoczne jest największe zróżnicowanie morfologii dna.

Zakres średnich wartości rzędnej dna dla czterech wykonanych map hipsometrycznych wyniósł od 75,1 do 76,4 m n.p.m. Dla najniższego badanego stanu i przepływu (A: 50 cm, 250 m³/s) średnia wartość rzędnej wynosiła 75,2 m n.p.m., natomiast dla najwyższego (C: 450 cm, 2520 m³/s) było to 76,4 m n.p.m., co stanowi najwyższą średnią wartość. Najniższą średnią wysokość powierzchni koryta (75,1 m n.p.m.) stwierdzono przy stanie średnim (D: 90 cm, 380 m³/s). Minimalną wartość rzędnej dna (71,2 m n.p.m.) oraz maksymalną (82,8 m n.p.m.) określono, podobnie jak w przypadku ścieżek echosondaży, dla najwyższego stanu wody (C). Różnica wartości najwyższej i najniższej średniej wysokości dna wynosi blisko 1,3 metra. Odchylenia standardowe wartości głębokości na mapach hipsometrycznych wynoszące od 1,13 do 1,57 m są wyższe od odchyłeń standardowych zarejestrowanych na ścieżkach echosondaży, co wynika z niedostępności stref przybrzeżnych o głębokości poniżej 0,5 metra. Najwyższe odchylenie standardowe (1,57) odnotowano dla rozkładu wartości wysokości na mapie hipsometrycznej przy najwyższym stanie (C), co potwierdza największe zróżnicowanie rzędnych dna dla tego stanu.

Na podstawie map hipsometrycznych dna przedstawionych w załącznikach 2 - 5 i na rysunku 39 wykonanych dla różnych stanów rzeki widać, że największe zmiany morfologii koryta można zauważyć w strefach przybrzeżnych koryta znajdujących się po przeciwnej stronie rynien. Szczególnie wyraźnie prawidłowość ta zaznacza się w okolicach ujęcia zasadniczego oraz w pobliżu mostu Łazienkowskiego po prawej stronie rzeki. Przy stanie wysokim (C) można także zauważyć podniesienie dna w części środkowej koryta głównie w strefie przed i za Ujściem Zasadniczym. Przy stanach niskich poza zmianami

w wymienionych fragmentach koryta zauważalne jest obniżanie się dna w pobliżu mostu Siekierkowskiego.

6.2 Budowa geologiczna obszaru badań

Na podstawie szczegółowej analizy materiałów archiwalnych oraz badaniom terenowym, opracowano: 1. przestrzenne zobrazowania w formie map geologicznych ścięcia poziomego (*Zał. 8, 9, 10*), 2. przekroju podłużnego (*Rys. 41*) oraz 3. model powierzchni stropowej utworów trudno rozmywalnych (*Rys. 40 i Zał. 7*). W oparciu o wyniki analiz granulometrycznych osadów korytowych obliczono również wartości współczynnika filtracji (*Zał. 18*), korzystając ze wzoru amerykańskiego (Pazdro 1964).

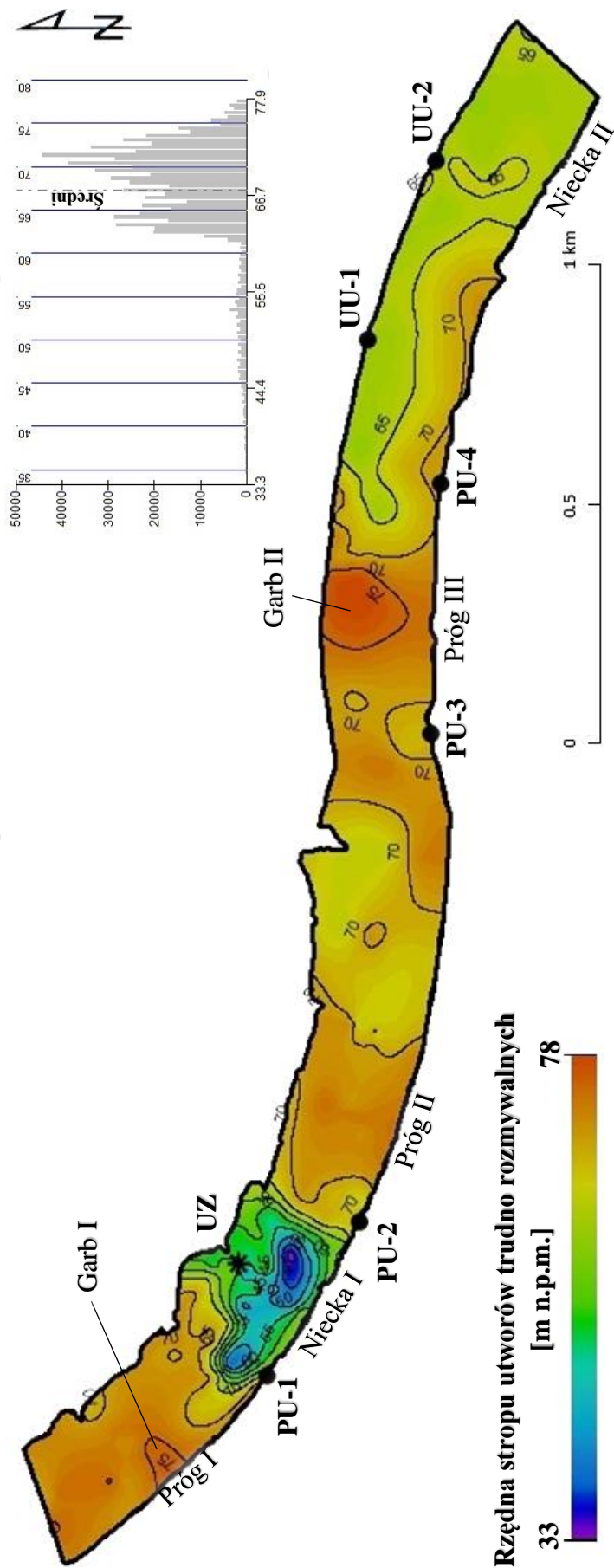
Przestrzenny model powierzchni stropu utworów trudno rozmywalnych posiada urozmaiconą geometrię. Można w jej obrębie wydzielić formy wypukłe oraz wklęsłe (*Rys. 40 oraz Zał. 7*). Zakres wysokości (rzędnych) uwzględnionych na modelu wynosi od 33,3 do 77,9 m n.p.m., a średnia wysokość stropu podłoża aluwiiów na tym obszarze wyniosła 67,3 m n.p.m.

W obrębie form wypukłych zidentyfikowano trzy proggi (I, II i III). Próg I znajduje się między mostem Łazienkowskim a ujęciem PU-1 (510,1–510,7 km biegu Wisły). Próg II występuje w górę rzeki od ujęcia PU-2 (509,3–509,7 km), natomiast próg III zaczyna się poniżej ujęcia PU-3 i ciągnie się aż do PU-4 (508,1–509,3 km). Na powierzchni progów I i III wyróżniono dwie kulminacje stropu utworów trudno rozmywalnych, które nazwano garbami. Garb I znajduje się blisko lewego brzegu poniżej ujęcia PU-1 (ok. 510,3 km), a Garb II jest umiejscowiony po prawej stronie koryta rzeki, w połowie drogi między ujęciami PU-3 i PU-4 (ok. 508,4 km). Wysokości (rzędne) w obrębie progów mieszczą się w przedziale od 70 do 77,9 m n.p.m., a garby występują w miejscach, gdzie wysokości przekraczają 75 m n.p.m. Najwyższy punkt (77,9 m n.p.m.) znajduje się na Garbie II.

W obrębie form wklęsłych wyróżniono dwie niecki – I i II. Niecka I zlokalizowana jest w strefie eksploatacyjnej w rejonie ujęć PU-1, PU-2 oraz Ujęcia Zasadniczego (509,7–510,1 km). Niecka II znajduje się powyżej ujęcia PU-4 i rozciąga się aż do mostu Siekierkowskiego. Wysokości w nieckach wynoszą od 33,3 do 65 m n.p.m. Niecka I jest bardzo głęboka i często nazywana jest wybojem; jej najgłębszy punkt określono na poziomie 33,3 m n.p.m. i jest to najniższy położony fragment analizowanej powierzchni. Strop utworów trudno rozmywalnych w tym miejscu został przewiercony w 2018 roku przez Państwowy Instytut Geologiczny (*Zał. 15*). Niecka II jest znacznie płytsza i bardziej rozległa, z maksymalną rzędą równą 62,1 m n.p.m. Obie niecki zajmują około 35% powierzchni badanego obszaru.

Zakres wartości: 33,3 – 77,9 m n.p.m.
 Średnia wartość: 67,3 m n.p.m.

Rozkład wartości wysokości
 [m n.p.m.]



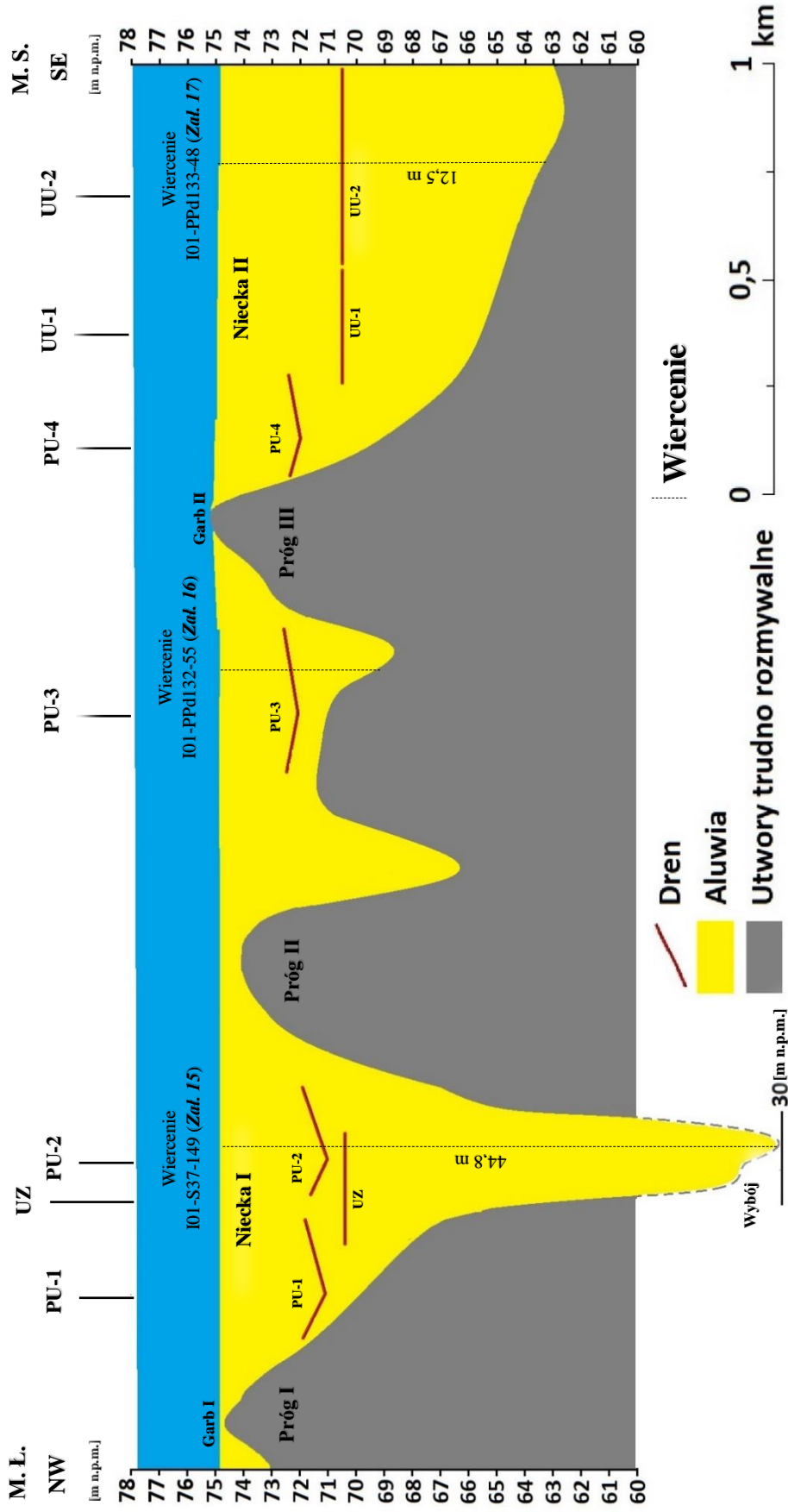
Rys. 40 Mapa hipsometryczna stropu utworów trudno rozmywalnych

Strefy modelu koryta położone na wysokościach od 65 do 70 m n.p.m. uznaje się za obszary przejściowe między progami a nieckami. Jedna z takich stref o długości przekraczającej 300 m znajduje się w części centralnej koryta. Jej średnia głębokość nie przekracza 8 m.

Mapy ścięcia poziomego na rzędnych od 61 do 75 m n.p.m. (*Zał. 8, 9, 10*) przedstawiają zgeneralizowany podział utworów korytowych na grunty trudno rozmywalne oraz aluwia korytowe. Na omawianych mapach zaznaczono również położenie drenów wszystkich ujęć infiltracyjnych. Dreny posadowione są na rzędnych od 70 – 72 m n.p.m. Wraz z głębokością zmniejsza się na kolejnych mapach powierzchnia zajmowana przez aluwia, a zwiększa się powierzchnia utworów trudno rozmywalnych (*Zał. 8, 9, 10, Rys. 41*). Na rzędnej 75 m n.p.m. płyty utworów trudno rozmywalnych występują jedynie w obrębie garbów I i II. Pięć metrów niżej utwory stanowiące podłoże aluwiów zajmują już ok. 40 % obszaru. Na powierzchni o rzędnej 65 m n.p.m. cały obszar poza obrębem niecek I i II pokrywają płyty utworów trudno rozmywalnych. Poniżej 61 m n.p.m. aluwia występują jedynie w głębokim wyboju przy Ujęciu Zasadniczym oraz ujęciach PU-1 PU-2.

Ukształtowanie powierzchni stropowej, miąższość aluwiów oraz rozmieszczenie drenów przedstawiono na podłużnym przekroju geologicznym (litologicznym) (*Rys. 41*). Linia przekroju została przeprowadzona środkiem koryta. Jej początek (lewa strona) znajduje się przy moście Siekierkowskim a koniec przy moście Łazienkowskim. W zdecydowanej większości pokazanych na mapach niecek znajdują się dreny ujęć infiltracyjnych. Do ewentualnej rozbudowy ujęć pozostała jedynie mała przestrzeń między progami II a ujęciem PU-3. Ponadto na analizowanym odcinku pod dnem koryta rzeki między ujęciami PU-3, a PU-4 przebiegają linie sieci telekomunikacyjnej oraz sieci energetycznej (*Zał. 11*). Jednak nie udało się znaleźć dostępnych, oficjalnych danych odnośnie dokładnych miejsc ich położenia, dlatego nie zostały one umieszczone na przekroju oraz mapach geologicznych. Niecka II rozciąga się także powyżej mostu Siekierkowskiego. Głębokości obu niecek oraz przestrzeni między progami II i III zostały udokumentowane wierceńiami. Ich położenie podano w załącznikach 15 i 17.

Mapy miąższości aluwiów (*Rys. 42*) przedstawiają pozornie podobny rozkład wartości. Największe miąższości stwierdzono w obszarach niecek I i II. W głębszej niecce I – tzw. wyboju – maksymalna miąższość aluwiów osiąga wartość 44 m. W przypadku niecki II miąższości zazwyczaj nie przekraczają 13 m. Najmniejsze miąższości (0-5 m) występują na powierzchni progów I, II i III. W strefie między progami II a III, miąższość aluwiów może przekraczać 10 m przy prawym brzegu rzeki, blisko ostrogi. Po lewej stronie koryta rzeki maksymalne miąższości aluwiów korytowych nie przekraczają 8 m.

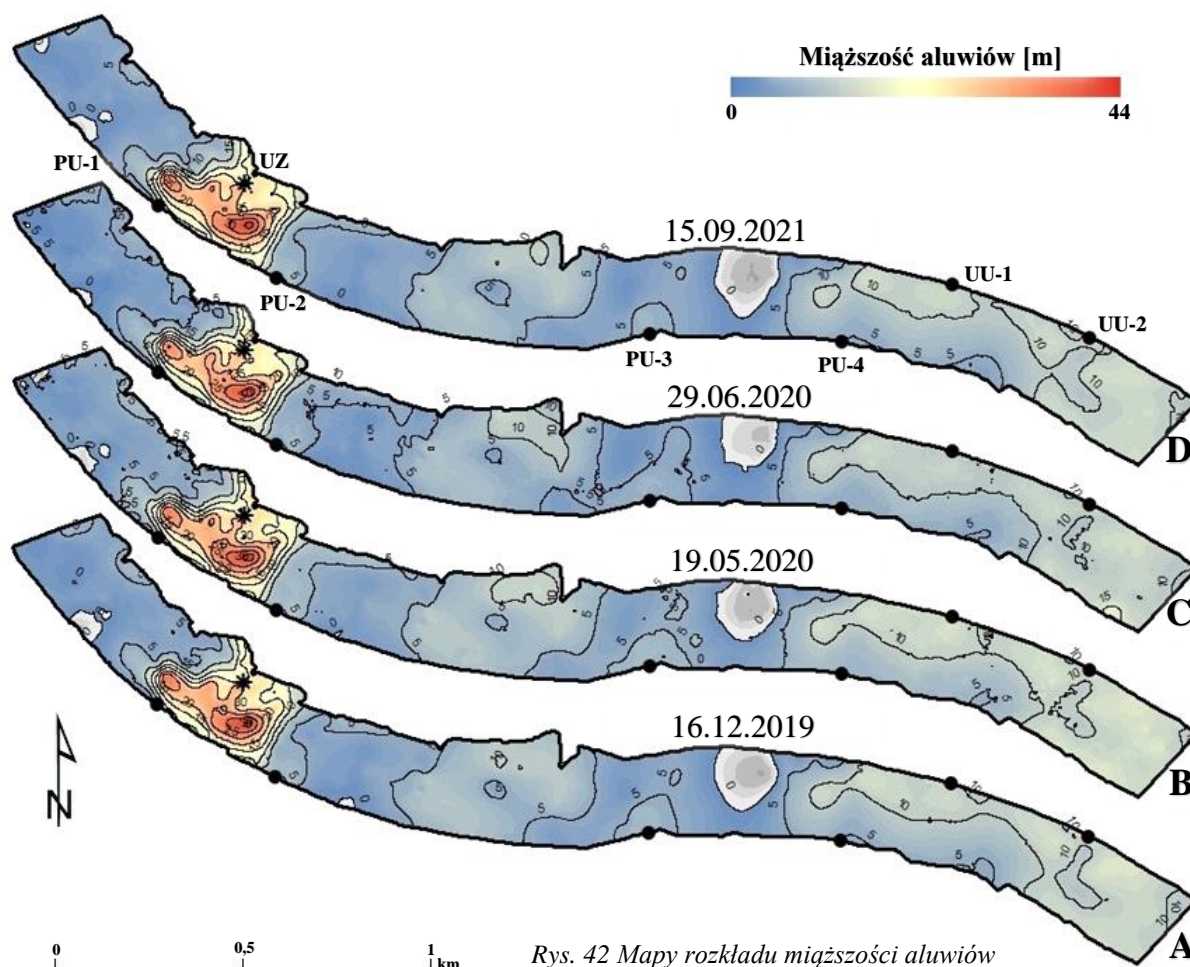


Rys. 41 Podłużny przekrój geologiczny

Na każdej z map miąższości (Rys. 42), niezależnie od stanu rzeki, widoczne są obszary, gdzie nie stwierdzono obecności aluwiów korytowych oraz powierzchnia stropu utworów trudno rozmywalnych odsłania się w dnie koryta. Porównanie danych wiertniczych z tych miejsc pokazuje obniżenie się tych powierzchni względem lat 50tych i 60tych, kiedy były wykonywane najstarsze wiercenia. Miejsca te (zaznaczone szarymi kolorami na mapie) pokrywają się z lokalizacją garbów I i II, czyli najwyższej położonych miejsc na powierzchni podłoża aluwiów. Znajdują się one w strefach przebiegu linii nurtu (Zał. 2-5).

Średnie wartości miąższości aluwiów w korycie określone dla czterech stanów (map) mieszczą się w zakresie od 7,4 do 7,9 m (Tab. 5). Najniższa średnia miąższość została odnotowana dla stanu średniego (138 cm), zaś najwyższa dla stanu wysokiego (450 cm). Policzone wartości średnich miąższości aluwiów są w dużej mierze zawyżone przez obecność wyboju (niecka I).

Orientacyjne objętości aluwiów w korycie badanego odcinka rzeki wyniosły od 5,83 do 6,56 mln m³ (Tab. 5). Największa objętość aluwiów została odnotowana przy najwyższym przepływie (2520 m³/s - C), zaś najmniejsza przy przepływie średnim (562 m³/s - D).



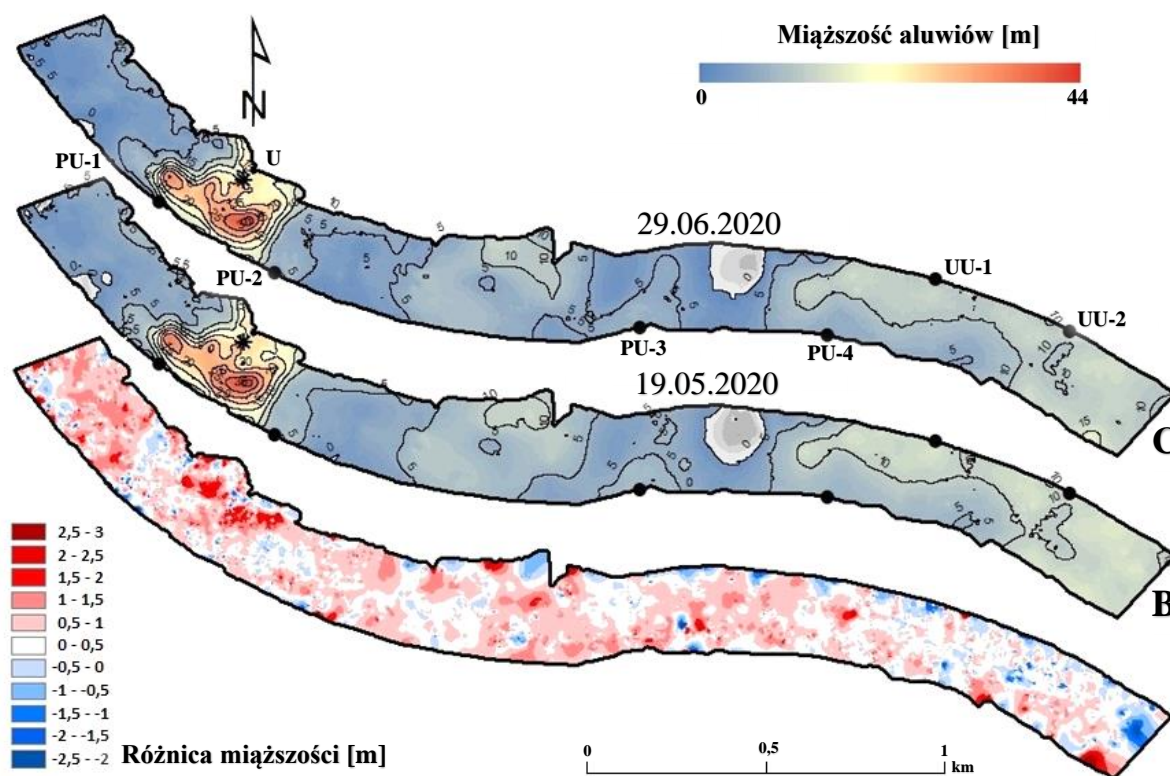
Rys. 42 Mapy rozkładu miąższości aluwiów

Tab. 6 Miąższość i objętość aluwiów przy danym stanie i przepływie

Data	Stan wody (wod. Wwa-Bulwary) [cm]	Przepływ (wod. Wwa-Bulwary) [m ³ /s]	Średnia miąższość aluwiów [m]	Objętość aluwiów w korycie [m ³]
A 16.12.2019	50 (niski)	250	7,57	5 937 216
B 19.05.2020	90 (niski)	380	7,86	6 161 624
C 29.06.2020	450 (wysoki)	2520	8,36	6 562 693
D 15.09.2021	138 (średni)	562	7,44	5 834 287

Zarejestrowana maksymalna różnica objętości wyniosła 0,73 mln m³, co odpowiada około 12% całkowitej objętości złoża względem wartości najmniejszej obliczonej objętości.

Uzyskane mapy miąższości aluwiów pozwoliły na analizę porównawczą zmienności miąższości złoża przy różnych stanach i przepływach. W celu określenia zmian miąższości złoża podczas wezbrania od wartości podanej na mapie dokumentującej warunki najwyższego stanu (C: 29.06.2020 – 450 cm) odjęto wartości z mapy wykonanej dla stanu niskiego stanu (B: 19.05.20 r. – 90 cm). Porównanie dwóch map miąższości B i C (Rys. 43) pozwoliło na wyznaczenie stref koryta o dodatnim i ujemnym bilansie miąższości złoża aluwialnego po przejściu kulminacji fali wezbraniowej. W wyniku wezbrania na niemal całym omawianym odcinku koryta Wisły doszło do zwiększenia miąższości złoża. Wskutek czerwcowego wezbrania (29.06.2020 r.) stwierdzono wzrost objętości złoża o ponad 400 tys m³ (6,5%) względem pomiarów przeprowadzonych w maju (19.05.2020 r.), co stanowi wzrost miąższości



Rys. 43 Różnica miąższości map B i C

średnio o 0,5 m. Powierzchnia dna została wyrównana wskutek zwiększonej depozycji materiału wleczonego w warunkach wzrostu przepływu i stanu rzeki.

W części koryta w rejonie Ujęcia Zasadniczego utworzyła się najbardziej zauważalna strefa akumulacji materiału naniesionego w wyniku wezbrania. W jej obrębie stwierdzono największe przyrosty miąższości złoża wynoszące lokalnie nawet 3 metry. Miejsca o ujemnym bilansie miąższości złoża zajmują niewielkie płyty powierzchni koryta i są zlokalizowane głównie w pobliżu obiektów hydrotechnicznych na prawym brzegu rzeki. Intensywne rozmycie materiału aluwialnego spowodowane wezbraniem nastąpiło, także przy moście Siekierkowskim, co może być tłumaczone oddziaływaniem filarów mostu (zwężeniem koryta).

Na podstawie opisów wykonanych wierceń i badań granulometrycznych pobranych w czasie wierceń próbek aluwiów korytowych można stwierdzić, że na badanym odcinku w powierzchni dna dominują aluwia korytowe w postaci piasków średnich i drobnych. W strefach głównego nurtu na powierzchniach wychodni podłoża aluwiów stwierdza się obecność żwirów i otczaków. W strefach stagnacji wód występują piaski drobne z domieszką pyłów i ilów. Stwierdzona zawartość substancji organicznej (I_{om}) w osadach takich stref wynosi od 0,40 do 12,06%. Osady te można zakwalifikować według normy PN-86/B-02480 jako namuły i namuły piaszczyste ($5\% < I_{om} < 30\%$). Wyniki badań granulometrycznych pozwoliły na określenie wartości średnic charakterystycznych. Na ich podstawie obliczono wartości współczynnika filtracji (*Zał. 18*), stosując wzór amerykański (Twardowski, Drożdżak 2006). Wyznaczone wartości współczynnika filtracji aluwiów korytowych Wisły na analizowanym odcinku mieszczą się w zakresie od $5,6 \times 10^{-6}$ do $4,4 \times 10^{-4}$ m/s. Odnotowane wartości współczynnika filtracji dla stref stagnacji są znacznie niższe i występują w zakresie od $5,6 \times 10^{-6}$ do $4,6 \times 10^{-5}$.

Powierzchnię trudno rozmywalnego podłoża aluwiów budują plioceńskie łył jeziorne oraz gliny lodowcowe (plejstocen). W rejonie projektowanego ujęcia PU-5 w podłożu aluwiów stwierdzono obecność wychodni namułów torfiastych i torfów, silnie skomprimowanych. Nie badano pozycji stratygraficznej tych osadów (Falkowski i in. 2021).

6.3 Oddziaływanie ujęć na dynamikę wód podziemnych

Na podstawie uzyskanych podczas badań z wykorzystaniem gradientomierza danych została przygotowana mapa rozkładu gradientu hydraulicznego (*Rys. 44*). Wartości gradientu hydraulicznego strefy brzegowej koryta na obszarze badań mieszczą się w zakresie od -0,71 do 1,17. Średnia wartość tego parametru na tym obszarze wyniosła 0,09, co świadczy o drenującym charakterze tego odcinka koryta a także o intensywnym wpływie ujęć na zmianę

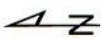
współoddziaływani wód podziemnych z powierzchniowymi. Zdecydowanie najniższe wartości tego parametru, świadczące o intensywnej infiltracji (downwelling), stwierdzono w punktach pomiarowych w pobliżu ujęcia zasadniczego (-0,37 – -0,7). Podobne wartości uzyskano w pobliżu ujęć uzupełniających UU-1 i UU-2 oraz PU-4 (-0,12 – -0,42). Najwyższe wartości gradientu hydraulicznego (powyżej 1) świadczące o drenażu wód podziemnych przez wody powierzchniowe (upwelling) stwierdzono głównie w strefie brzegowej w pewnym oddaleniu od ujęć (Rys. 44). Uzyskane wyniki pozwalają na wskazanie stref, gdzie zaznacza się wyraźny wpływ ujęć infiltracyjnych na relacje wód powierzchniowych z podziemnymi. Na skutek prowadzonej eksploatacji ujęć poddennych, drenujący charakter rzeki zmienił się w strefie brzegowej na infiltrujący.

Wpływ eksploatacji na dynamikę przepływu wód podziemnych w strefie przypowierzchniowej zaznacza się także w sąsiedztwie budowli regulacyjnych – ostróg (a, b i c). W każdym z tych miejsc, w obrębie strefy brzegowej powyżej ostrogi stwierdzono dodatnie wartości gradientu hydraulicznego w zakresie od 0,8 do 1. Wartości te świadczą o drenażu wód podziemnych. W strefie poniżej ostrogi odnotowane wartości są znacznie mniejsze i wynoszą od -0,2 do 0,4.

Według informacji uzyskanych z MPWiK podczas wykonywanych pomiarów gradientomierzem pracowały wszystkie ujęcia infiltracyjne. Niektóre z drenów były przejściowo wyłączone z użytku (PU-3 dren 1 i 6, PU-4 dren 2). Wydajności ujęć w tych dniach podano w *Tab. 6*. W dniach wykonanych pomiarów najbardziej intensywny pobór wody był prowadzony w strefie przy trzech ujęciach UZ, PU-1 oraz PU-2. W tych miejscach stwierdzono najniższe wartości gradientu hydraulicznego.

Tab. 7 Wydajności dobowe ujęć infiltracyjnych w wymienionych dniach (dane uzyskane z MPWiK)

	UZ [m ³ /d]	PU-1 [m ³ /d]	PU-2 [m ³ /d]	PU-3 [m ³ /d]	PU-4 [m ³ /d]	UU-1 [m ³ /d]	UU-2 [m ³ /d]	Stan wody, wodowskaz Wwa-Bulwary [cm]
19.10.21	60000	43432	48880	31200	28800	7875	44263	102
21.10.21	60000	45256	52560	20600	28800	9505	43752	102
26.10.21	60000	42008	48768	31200	28800	11269	43656	105
02.11.21	60000	36519	42231	27600	26400	10188	44515	191



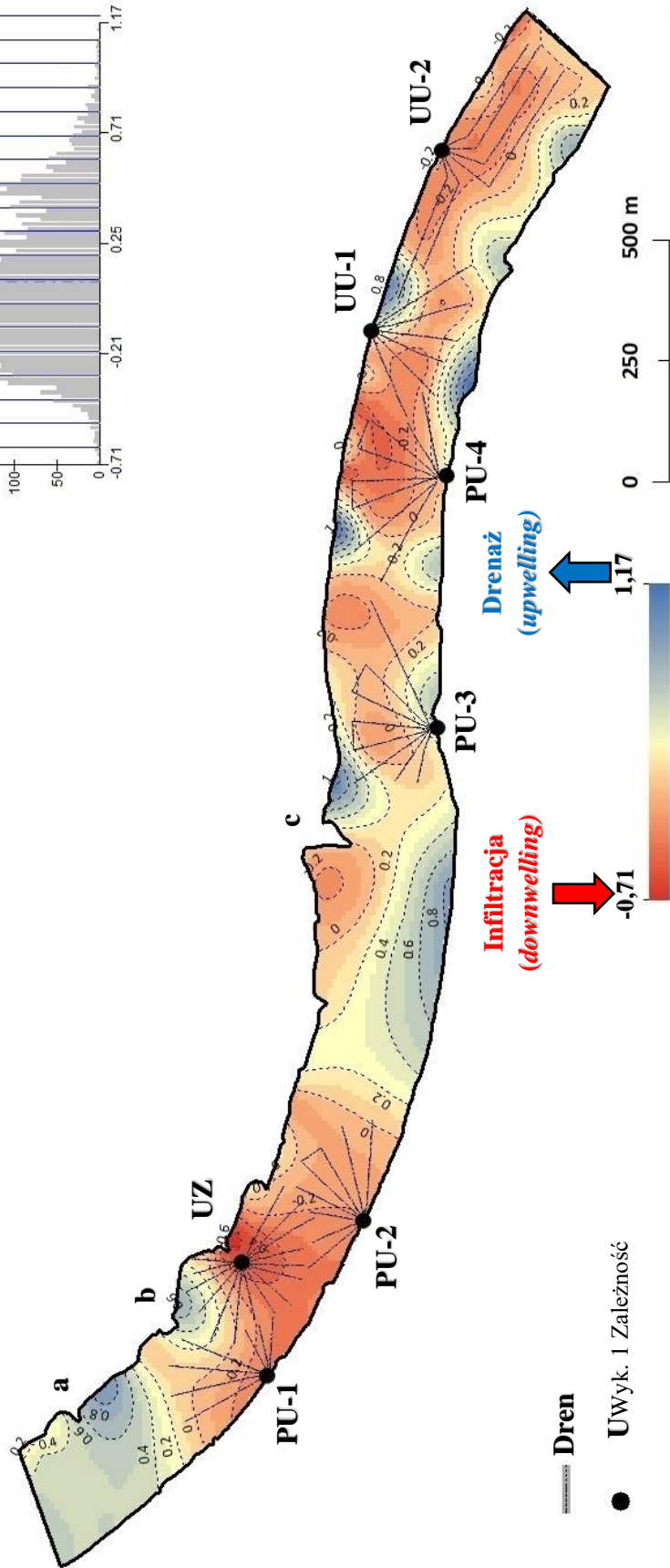
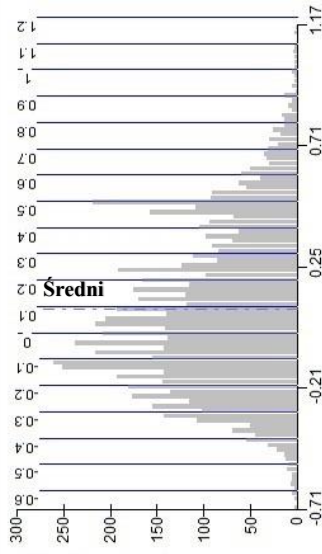
Rozkład wartości gradientu hydraulicznego

Ilość bloków obliczeniowych: 7 841

Zakres wartości gradientu hydraulicznego (i): -0,76 – 1,17

Średnia wartość (i): 0,09

Odchylenie standardowe (i): 0,30



Rys. 44 Mapa rozkładu gradientu hydraulicznego

6.4 Rozkład prędkości wody w korycie

Wykonane mapy rozkładu prędkości przepływu wody przedstawiono łącznie w kolejności od najniższego do najwyższego stanu na (Rys. 45). Mapy od A do D ułożone są chronologicznie. Mapy pozwalają na analizę porównawczą zmian prędkości. Pozwala ona na wydzielenie miejsc charakteryzujących się pewną specyfiką rozkładu prędkości, które poddano bardziej szczegółowej analizie.

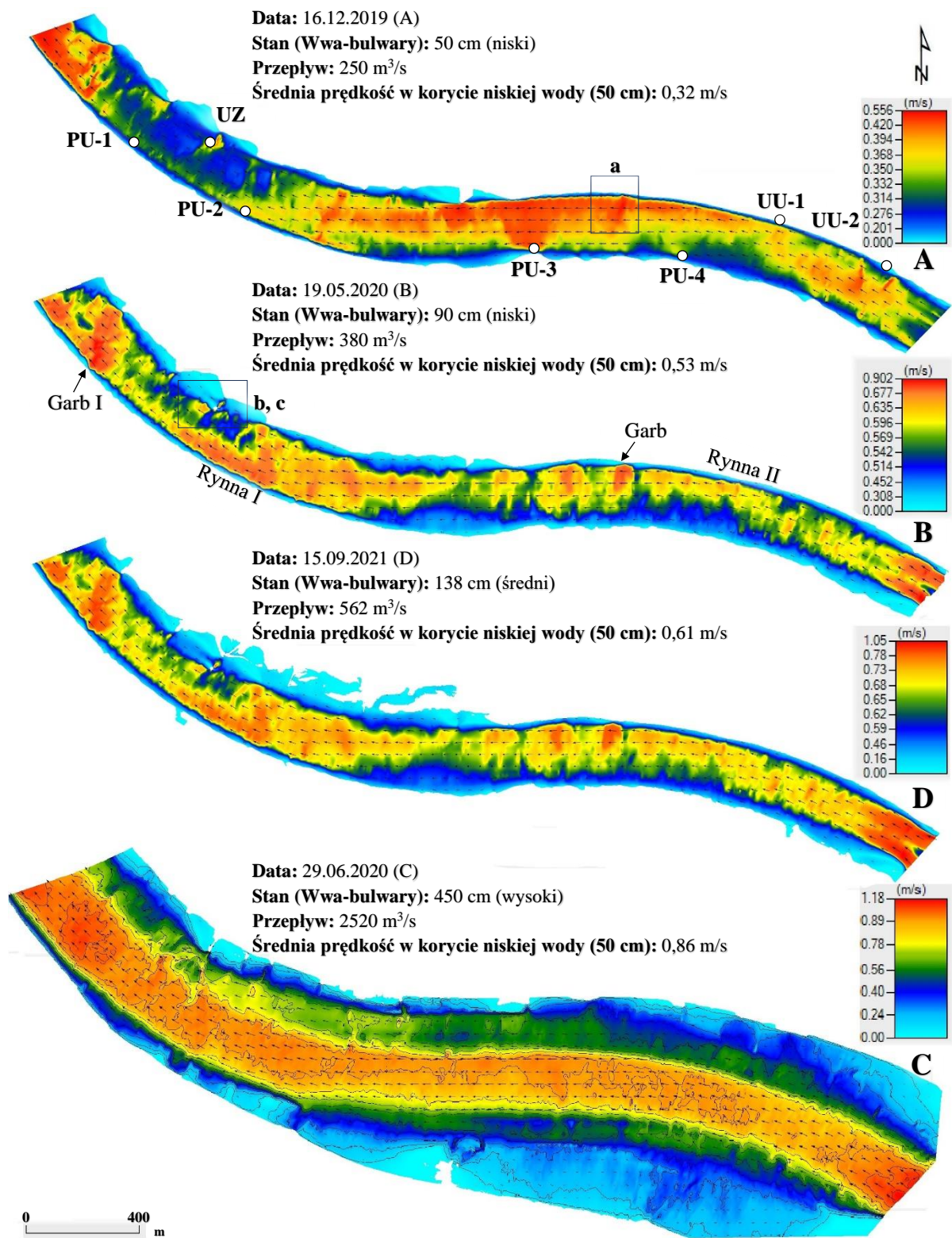
Przy najniższym stanie i przepływie (A: 50 cm, 250 m³/s) największe prędkości występowały w strefach zwężeniem i wypłyceń koryta w miejscach, gdzie stwierdzono obecność garbów (I i II) zbudowanych z utworów trudno rozmywalnych oraz z obecnością umocnionych brzegów. Maksymalna prędkość w tym odcinku wynosiła na modelu ponad 0,55 m/s. Takie prędkości występują głównie w części środkowej badanego obszaru po prawej stronie koryta rzeki, przy umocnionym brzegu (Rynna II), na przeciwko ujęć PU-3 oraz PU-4, a także przy moście Łazienkowskim (Rys. 45).

W warunkach najniższego przepływu (A) i najniższego stanu na modelu pojawiają się najbardziej rozległe strefy wód stagnujących o prędkościach nieprzekraczających 0,2 m/s. Strefy te występują głównie wzdłuż brzegu, szczególnie w okolicach ostróg. Zazwyczaj jest to po przeciwnej stronie niż linia/linie nurtu. Średnia prędkość przepływu wyniosła na modelu w takich strefach 0,32 m/s (Rys. 45).

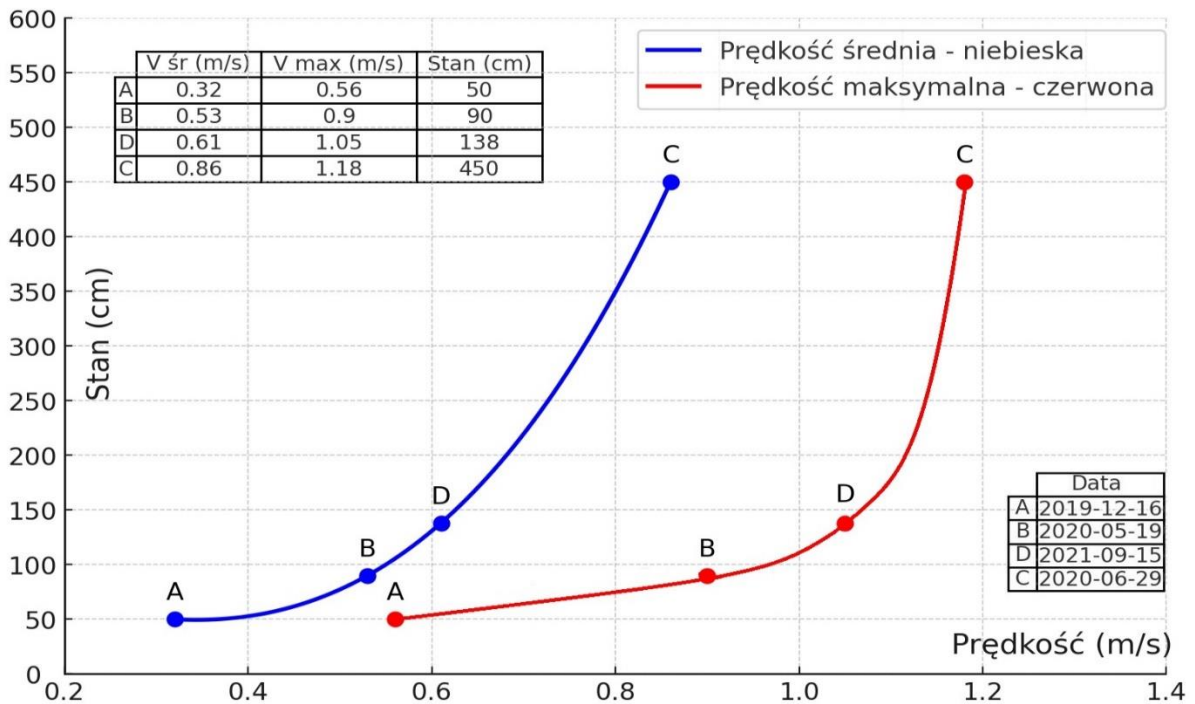
Przebieg linii brzegowej dla najniższego modelowanego stanu jest niemal identyczny w porównaniu z granicami ustalonymi na podstawie nagrań wykonanych za pomocą bezzałogowego statku powietrznego przy stanie wody wynoszącym 54 cm. Dokładne zasięgi rzeki dla danego stanu na podkładzie ortofotograficznym zostały przedstawione na rysunku 45.

Przy wyższym stanie (B: 90 cm; nadal w strefie stanów niskich), maksymalne prędkości znacznie wzrosły, przekraczając 0,9 m/s. Miejsca występowania najwyższych prędkości dla tego stanu nadal są związane z obecnością progów oraz garbów. Wysokie prędkości powyżej 0,6 m/s pojawiły się w rynnice I, a także w pobliżu mostu Siekierkowskiego. Zmniejszeniu uległa powierzchnia stref o najmniejszych prędkościach. Średnia prędkość przepływu określona w zasięgu koryta niskiej wody (50 cm) dla tego stanu (B) wyniosła 0,53 m/s i była wyższa od średniej prędkości przepływu (A) o 0,2 m/s (Rys. 45).

Najmniejsze zmiany średnich prędkości zarejestrowano w modelu pomiędzy stanem 90 cm a 138 cm (Wyk. 1). Najwyższe odnotowane prędkości (1,05 m/s) dla stanu średniego (D) stwierdzono w niemal identycznych miejscach jak przy stanie 90 cm. Obszar, gdzie prędkości



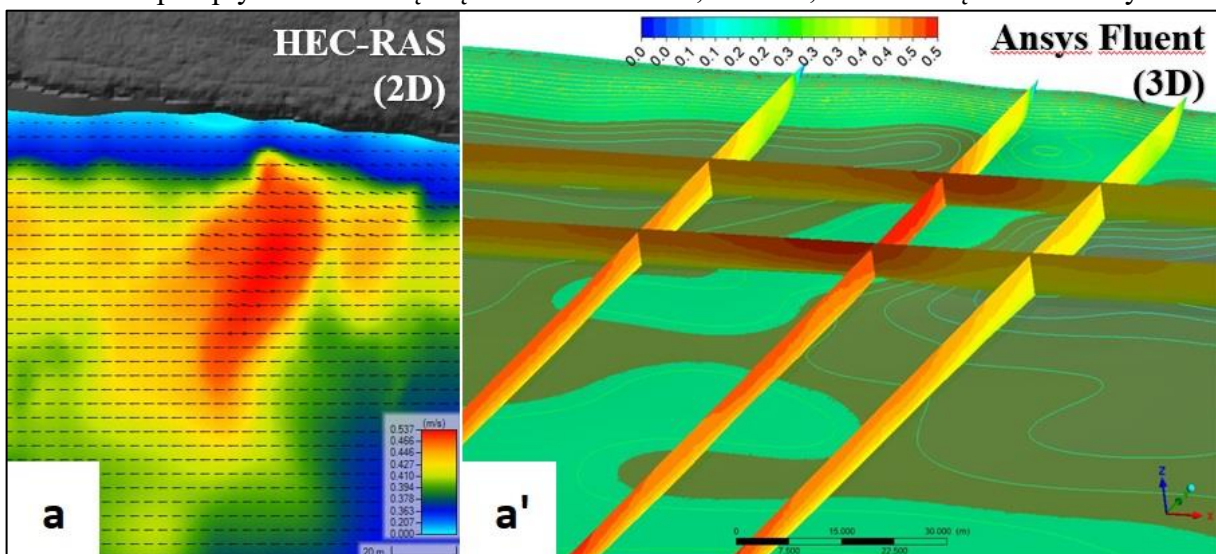
Rys. 45 Mapy rozkłady prędkości w korycie przy różnych warunkach przepływu



Wyk. 2 Zależność prędkości średniej i maksymalnej przepływu od stanu wody

były mniejsze niż 0,2 m/s w porównaniu ze stanem najniższym zmniejszył swoją powierzchnię. Średnia prędkość przy przepływie wynoszącym 562 m³/s określona w zasięgu koryta niskiej wody (50 cm) osiągnęła 0,61 m/s, wzrastając względem stanu B o zaledwie 0,08 m/s. Pomimo niewielkich zmian prędkościowych w korycie wyraźnie zwiększył się zasięg koryta o tereny znajdujące się po prawej stronie rzeki między ostrogami (Rys. 45).

Przy najwyższym zbadanym stanie i przepływie (C: 450 cm i 2520 m³/s) zdecydowanie znalazło zróżnicowanie prędkości przepływu wody w korycie, a kierunek przepływu został mocno zgeneralizowany. Na niemal całym badanym odcinku rzeki wartości prędkości dla tych warunków przepływu mieszczą się w zakresie od 0,70 do 1,18 m/s. Prędkość maksymalna



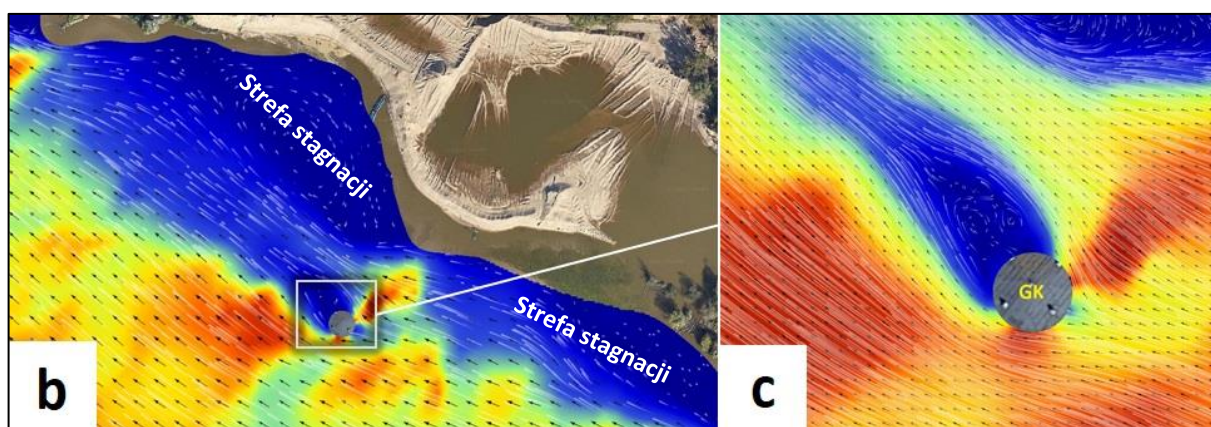
Rys. 46 Wpływ obecności garbu II na prędkość przepływu (a – modelowanie 2D, a' – modelowanie 3D)

względem stanu średniego (D) wzrosła o 0,13 m/s, jednak średnia prędkość odnotowana w zasięgu koryta niskiej wody (50 cm) zwiększyła się aż o 0,25 m/s. Przy najwyższym analizowanym stanie wody wpływ dna rzeki na rozkład prędkości okazał się najmniejszy. Natomiast zwiększył się wpływ obecności mostów, w pobliżu których zaobserwowano wyraźny wzrost prędkości przepływu, osiągający najwyższe wartości (1,18 m/s). Koryta w modelu przy stanie 450 zajmuje niemal całą powierzchnię międzywala.

Na podstawie wykonanych dwuwymiarowych modeli przepływu stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem stanu wzrost prędkości maksymalnych oraz średnich ma charakter wykładniczy (Wyk. 1).

Dla najniższego przepływu zbadano na modelu wpływ naturalnej (geologicznej) przeszkody jaką jest Garb II (Rys. 46) znajdujący się między ujęciem PU-3 i PU-4. Zarówno w modelu 2D (a) jak i 3D (a') potwierdziło wzrost prędkości płynącej wody w strefie występowania tej kulminacji podłoża aluwiiów, a także jej niewielką zmianę kierunku przepływu. Określone w obu modelach prędkości są bardzo zbliżone do siebie, wynosząc ponad 0,55 m/s. Fakt ten przemawiać może za poprawności ich wykonania.

Na modelu rozkładu prędkości w warunkach stanu niskiego (B) (Rys. 45) zaznaczył się także wpływ obecności ujęcia zasadniczego (GK) (b i c Rys. 47.). Poniżej „Grubej Kaśki” zgodnie z kierunkiem przepływu widać wyraźny cień świadczący o gwałtownym zahamowaniu prędkości. Prędkości odnotowane poniżej Ujęcia Zasadniczego nie przekraczają 0,4 m/s. Natomiast na powierzchni tunelu prowadzącego do Ujęcia Zasadniczego widać wyraźny wzrost prędkości przepływającej wody. Na powierzchni tunelu przy stanie niskim prędkości przyjmują wartości od 0,6 do 0,7 m/s



Rys. 47 Strefa stagnacji (b) przy Ujęciu Zasadniczym oraz „cień” za „Gruba Kaśką”

7 DYSKUSJA

7.1 Warunki pracy ujęć

Główną cechą morfodynamiki koryta Wisły na odcinku pomiędzy mostami Siekierkowskim i Łazienkowskim zapewniającą efektywne i stabilne działanie ujęć poddennych jest odpowiednia miąższość warstwy aluwiów korytowych stanowiących naturalne złoża filtracyjne ujęć oraz jej ciągła wymiana. Odpowiednia miąższość złoża aluwialnego zapewnia wystarczający czas infiltracji warunkujący efektywne wstępne oczyszczenie wody. Istotny jest, także skład granulometryczny aluwiów. Zbyt drobna frakcja wydłuża czas infiltracji przyczyniając się na ogół do polepszenia jakości ujmowanej wody jednak kosztem wydajności poszczególnych drenów ujęć infiltracyjnych. Drobna frakcja utworów korytowych związana jest zawsze ze zmniejszeniem prędkości przepływu (Hjulström 1935, Allen 1970), a także z możliwością depozycji utrudniającej technologię uzdatniania materii organicznej (namulów). Na podstawie wieloletnich doświadczeń MPWiK przy eksploatacji ujęć infiltracyjnych pożądanym gruntem stanowiącym naturalne złoża aluwialne są piaski gruboziarniste cechujące się wartościami współczynnika filtracji w zakresie $10^{-4} - 10^{-3}$ m/s. Natomiast najczęściej występującym gruntem budującym złoża na badanym odcinku występującym nad drenami są piaski średnio i drobnoziarniste o gorszych parametrach filtracyjnych ($10^{-5} - 10^{-4}$ m/s). Wraz z postępującymi zmianami klimatu skutkującymi coraz dłuższymi okresami suszy hydrologicznej można przypuszczać, że osady na tym obszarze będą się składać z coraz drobniejszego materiału aluwialnego typowego dla przepływów niskiej wody.

Aby zapewnić naturalną wymianę aluwiów korytowych i zapobiec akumulacji materiału drobnoziarnistego oraz niepożądanej materii organicznej, prędkość przepływu powinna wynosić około 0,8 m/s ((Koczko, Pacholec, Mossakowska 1995). Dreny ujęć powinny zatem pracować w warunkach przepływu odpowiadających strefie nurtowej, najczęściej zlokalizowanej po środku koryta, między strefą wód stagnujących, a obszarem przebiegu linii nurtu. W strefie takiej miąższość aluwiów zmienia się w związku z przemieszczaniem się po dnie form korytowych (Allen 1970), a także w związku ze zmianą głębokości przeróbki uzależnionej od wielkości przepływu (Falkowski 2006, Falkowski, Ostrowski 2012). A zatem niezakłóconą pracę ujęć warunkuje lokalizacja drenów w strefie niecek I i II, czyli w miejscach obniżen stropu trudno rozmywalnego podłoża utworów korytowych. Miąższości w obu nieckach przekraczają 13 m, a w strefie wyboju w pobliżu Ujęcia Zasadniczego oraz PU-1 i PU-2 miąższość aluwiów może przekraczać nawet 44 metry. Bardzo duża miąższość w tym

miejscu była przyczyną rozważania wstępnego projektu „Grubej Kałki”, który zakładał dwupiętrowy system drenażowy.

Duże miąższości warstwy aluwialnej zapewniają możliwość posadawiania drenów na głębokościach poniżej strefy przeróbki wezbraniowej przeciętnego wezbrania. Jest to w tym wypadku wspomniana głębokość 4-6 metrów poniżej powierzchni dna koryta w warunkach średnich stanów. Dreny posadowione w obrębie strefy przeróbki narażone są na odsłanianie ich w czasie przepływu o większym natężeniu. Przykładem mogą być dreny ujęć znajdujących się na lewym brzegu (PU-1 i PU-2), gdzie ze względu na kształt koryta (brzeg wklęsły) oraz położenie stropu trudno rozmywalnego podłoża aluwiiów miąższość aluwiiów może ulegać znaczącej redukcji.

Niewielkie miąższości złoża występują nad progami, które zazwyczaj pokryte są naturalną zbroją – kamienną rafą, przeciwdziałającą erozji dennej (tak zwane pancerne dno). Najniższa średnia miąższość złoża aluwialnego przy stanie 138 cm i przepływie 562 m³/s w przekroju wodowskazu Bulwary wynosiła 7,44 m. Świadczy to o tym, że największa redukcja złoża filtracyjnego na całym analizowanym odcinku koryta Wisły najprawdopodobniej zachodzi podczas długo utrzymujących się stanów średnich, natomiast krótkotrwała i najbardziej efektywna wymiana (w tym najintensywniejsze wypłukiwanie) złoża zachodzi podczas wezbrań.

Obecnie na badanym odcinku brak aluwiiów stwierdza się w dwóch punktach: na garbie I oraz II, niezależnie od stanu rzeki. W tych miejscach względem lat 50 minionego wieku najprawdopodobniej doszło do erozji wgłębnej zapoczątkowanej działalnością człowieka w postaci dzikiej eksploatacji kamieni oraz głazów narzutowych, a także uregulowaniem i znacznym zawężeniem koryta. Obecne koryto niskiej wody jest niemal dwukrotnie węższe niż jeszcze w latach 30 dwudziestego wieku. Intensywność pogłębienia dna przypuszczalnie była największa od razu po wprowadzeniu zmian w korycie rzeki i stopniowo malała wraz z upływem lat oraz zaniechaniem szkodliwej eksploatacji materiału kamienistego z powierzchni progów. Aktualnie pojawiają się doniesienia o pogłębieniu dna rzeki powyżej badanego odcinka Wisły, niedaleko Elektrociepłowni Siekierki. Za obecne, okresowe pogłębienie się dna może odpowiadać piaskarnia zlokalizowana na lewym brzegu, powyżej mostu Siekierkowskiego.

Wykonane porównanie map miąższości (B i C *Rys. 43*) pozwoliło na wskazanie miejsc w których podczas wezbrania zachodzą największe zmiany miąższości aluwiiów. Najbardziej zauważalne zmiany morfologii dna po przejściu fali wezbraniowej stwierdzono w rejonie

Ujęcia Zasadniczego (Rys. 43). Na tym obszarze stwierdzono depozycję materiału miejscowo przekraczającą nawet 3 metry. Przy czym ogół tych zmian nie musi należeć do procesów naturalnych. Przy Ujęciu Zasadniczym stale prowadzone są działania naprawcze z wykorzystaniem spulchniaczy hydraulicznych i pogłębiarek.

7.2 Znaczenie podłoża aluwiów dla morfodynamiki

Mięszość aluwiów jest silnie związana z ukształtowaniem powierzchni podłoża aluwiów. Na odcinku Wisły warszawskiej mamy do czynienia z długą, ponad 20 km kulminacją podłoża aluwiów (Falkowski 1982, 1990, Falkowski 2006, Falkowski i inni 2017).

Jej powierzchnia ma dość złożoną morfologię, co pokazano także na przekrojach koryta wykonanych na zamówienie Zarządu Transportu Miejskiego już w 1936 roku (Różycki, Sujkowski 1936). Na badanym odcinku w powierzchni podłoża wydzielono: progi (I, II i III), niecki (I i II) oraz w zakresie występowania progów garby (I i II). Niecka I ukształtowana jest w formie głębokiego wyboju o genezie naturalnej – glacitektonicznej (Zal. 7).

W powierzchni podłoża stwierdza się wychodnie głównie osadów spoistych, takich jak ropy zastoiskowe, gliny zwałowe, a także neogeńskie ropy plioceńskie. W niektórych miejscach występują także wychodnie silnie zagęszczonych plejstocenijskich osadów rzecznych (fluwioglacjalnych). Powierzchnia podłoża aluwiów pokryta jest warstwą rezydualnego bruku (pancerne dno). Fakty te uzasadniają traktowanie całej powierzchni podłoża aluwiów jako trudno rozmywalnej (Falkowski 1990, Falkowski 2017).

W warunkach naturalnej zmienności przepływu powierzchnia podłoża bywa odsłaniana, czego świadectwem jest warstwa rezydualna. Dno koryta jest pogłębiane do tej powierzchni w warunkach przepływów wezbraniowych (Falkowski 2006). Sprzyja temu zwężenie koryta „gorsetu warszawskiego” (Magnuszewski i inni 2009, 2012), w obrębie, którego prędkości przepływu są największe.

Dla funkcjonowania ujęć infiltracyjnych istotne znaczenie ma także przepuszczalność utworów występujących w podłożu aluwiów. Przepuszczalność ropy neogenu (plioceńskich) jest $< 1 \times 10^{-8}$ m/s (Macioszczyk, Dobrzyński 2007). Nieco wyższe wartości współczynnika filtracji rzędu 1×10^{-6} m/sek posiadają gliny morenowe. Charakteryzują się one dużą różnorodnością facjalną (Ruszczyńska-Szenajch 1998). Podobne wartości posiadają występujące w podłożu utwory zastoiskowe.

Słaba przepuszczalność utworów budujących podłoże aluwiów korytowych ogranicza zasilanie ujęć wodami podziemnymi. W przypadku posadowienia drenów na powierzchni podłoża jak to jest często w przypadku ujęć lewobrzeżnych dopływ wód podziemnych może

być wyłącznie lateralny z serii budujących przyległy do koryta taras zalewowy (również zalewową).

Ze względu na wzmożony dopływ boczny, naturalny charakter badanego odcinka rzeki jest drenujący tzn. wody powierzchniowe zasilane są przez podziemne. Przeprowadzone badania gradientometryczne wykazały, iż ujęcia infiltracyjne zmieniają współdziałanie wód podziemnych z powierzchniowymi po przez zmianę naturalnego charakteru rzeki z drenującego na infiltrujący. W strefach zasięgu występowania wpływu ujęć (infiltracji) może dochodzić do intensyfikacji procesu kolmatacji złoża aluwialnego.

Istotne znaczenie dla jakości eksploatowanych wód może mieć także litologia utworów budujących podłoże aluwiów. Powyżej ujęcia PU2, w części centralnej koryta stwierdzono w czasie badań wychodnie skompresowanych utworów sapropelowych i torfów o nieokreślonej pozycji stratygraficznej. Może on być osadem interglacjalnym, który znajduje się w obrębie serii zaburzonych glacitektonicznie utworów neogenu i plejstocenu (Falkowski i in. 2022). Obecność utworów organicznych w strefie dopływu wody do drenu może być przyczyną komplikacji procesu jej uzdatniania/oczyszczania.

Ukształtowanie powierzchni stropowej utworów trudno rozmywalnych ma decydujące znaczenie dla transportu aluwiów oraz rozkładu prędkości wody w korycie. Najbardziej zauważalny wpływ na prędkość i kierunek przepływu wody występuje na powierzchni kulminacji mającej morfologiczną postać garbów I i II (*Zał 7*).

7.3 Związek zróżnicowania prędkości przepływu w korycie z morfodynamiką

Największa zmienność morfologii dna, poza obszarem znajdującym się w sąsiedztwie „Grubej Kałki” została zaobserwowana w strefach czasowo tranzytowych, czyli takich w których podczas niskich stanów zachodzi akumulacja drobniejszego materiału, a podczas zwiększonego przepływu następuje wypłukiwanie osadzonych aluwiów (*Rys. 43*). Najintensywniejszy transport aluwiów korytowych występuje w strefie tranzytowej znajdującej się na linii najwyższych prędkości – linii nurtu.

Zróżnicowanie prędkości przepływu determinuje rodzaj deponowanego materiału aluwialnego. Wykonane mapy rozkładu prędkości (*Rys. 45*) w korycie potwierdziły miejsca występowania stref wód stagnujących na obszarze których następuje intensywna sedymentacja utworów drobnoziarnistych wraz z materią organiczną z zawiesiny. W strefach tych stwierdzone prędkości przepływu nie przekraczają 0,2 m/s. Deponowane w strefach stagnacji osady to piaski drobne z domieszką pyłu, a nawet ilu o zawartości substancji organicznej do 12,06%. Osady takie spotykano w strefie koryta na całym odcinku Wisły Warszawskiej

(Falkowski, Ostrowski 2012). Opisano je także w rejonie ujęcia Zasadniczego „Gruba Kaśka” (Falkowski i in. 2004). Strefy stagnacji stwierdzono na badanym odcinku w rejonie przybrzeżnym po przeciwnej stronie przebiegu linii nurtu. Najbardziej rozległe strefy stagnacji stwierdzono między ostrogami przy Ujęciu Zasadniczym oraz w części centralnej przy lewym brzegu, w pobliżu planowanej lokalizacji ujęcia PU-5 (Rys. 47). Warto zaznaczyć, iż obiekty hydrotechniczne – ostrogi, przy których powstają strefy stagnacji projektowane były dla stanów średnich, które obecnie występują znacznie rzadziej niż stany niskie. W związku z tym wpływają one na nadmierne zahamowanie przepływu, skutkujące akumulacją materiału drobnociarnistego, często wraz z niesioną przez wody Wisły materią organiczną.

7.4 Znaczenie strefy hyporeicznej

Strefa przejściowa (ekoton) pomiędzy wodami powierzchniowymi, a podziemnymi pozwala na wstępne oczyszczenie wody czerpanej ujęciami poddennymi. Wykształcenie i charakterystyka naturalnego filtra rzecznoego, zwanego strefą hyporeiczną decyduje o skuteczności usuwania zanieczyszczeń (Marciniak i in., 2023) i wpływa na jakość ujmowanej wody infiltracyjnej. Na badanym odcinku rzeki najwyższą efektywność infiltracji była odnotowywana pod względem m.in. zmniejszenia mętności, barwy, zawartości RWO oraz zmniejszenia stężenia tlenu (Olejnik A., 2018). Jak już wspomniano, na drodze infiltracji przy odpowiedniej miąższości złoża możliwe jest niemal całkowite zatrzymanie planktonu, bakterii, a także znaczne obniżenie stężenia azotu amonowego oraz żelaza (Pacholec, Zdanowicz 2008).

W celu zachowania wysokiej skuteczności strefy hyporeicznej w naturalnym procesie oczyszczania wody niezwykle ważna jest jej ochrona. Istotne jest zachowanie stałych warunków pozwalających na rozwój organizmów odpowiedzialnych za procesy oczyszczania wody oraz ograniczenie negatywnie wpływających na nie ingerencji człowieka. Zakładając konieczność wykorzystywania spulchniaczy hydraulicznych oraz pogłębiarek przy ujmowaniu wody ujęciami infiltracyjnymi, równie ważne jest, aby te działania były przemyślane i wykonywane w odpowiednich miejscach. Wymaga to dalszych badań ukierunkowanych na zachowanie właściwości strefy hyporeicznej w warunkach silnej presji wynikającej z oddziaływania związanej z korytem infrastruktury, a także w związku z prowadzonymi przez MPWiK pracami naprawczymi złoża filtracyjnego. Specyfikę środowiska kształtuje także dopływ dotlenionych wód w dół, przez warstwę aluwialną. Na analizowanym odcinku Wisły niezbadanym dotąd zagadnieniem jest na przykład różnorodność organizmów zasiedlających strefę hyporeiczną ponad drenami ujęć.

7.5 Wpływ prac naprawczych oraz obecnej w korycie infrastruktury na warunki eksploatacji ujęć

Zakładając występowanie na badanym odcinku Wisły coraz większej liczby dni w ciągu roku ze stanem niskim oraz nieregularne występowanie wezbrań, należy spodziewać się wyhamowania naturalnej wymiany złoża aluwialnego nad drenami. Wraz ze zmniejszeniem tempa transportu osadów oraz zmniejszeniem możliwości ich wymiany następuje intensyfikacja kolmatacji oraz konsolidacji złoża. Ze względu na wzmożenie negatywnych procesów zachodzących w korycie, w celu poprawy sytuacji, najłatwiejszym rozwiązaniem przeciwdziałającym zagęszczeniu materiału nad drenami mogły by być częstsze działania naprawcze z wykorzystaniem spulchniaczy hydraulicznych i pogłębiarek. Ich dokładny wpływ na złoże nie został jeszcze szczegółowo opisany. Wykorzystywanie tych urządzeń prawdopodobnie nie sprzyja rozwojowi i działaniu strefy hyporeicznej w zakresie oczyszczania chemicznego i biologicznego wody.

Najgorsze warunki przepływu, a tym samym akumulacja niepożądanego materiału aluwialnego często wraz z dużymi ilościami materii organicznej występują głównie w strefach międzyostrogowych. Główną przyczyną odnotowywanych bardzo niskich prędkości przepływu jest obecność budowli regulacyjnych i dominacja w ostatnich latach na badanych odcinku stanów niskich. Zakładając wydłużenie czasu trwania suszy hydrologicznych w najbliższych latach, proces ujmowania wody spod dna Wisły będzie coraz bardziej utrudniony, szczególnie w strefach znacznego zmniejszenia prędkości przepływu (przy UZ lub przy miejscu lokalizacji nowego ujęcia PU-5). Ze względu na panujące warunki i pogłębiające się problemy eksploatacyjne w wymienionych strefach, racjonalnym rozwiązaniem wydawałoby się zrewidowanie aranżacji budowli regulujących przepływ i dostosowanie ich do obecnie panującego reżimu hydrologicznego i rozmieszczenia ujęć infiltracyjnych. Wydaje się wartym zastanowienia np. skrócenie zasięgu lub całkowite rozebranie budowli powodujących/związanych z depozycją drobnego materiału aluwialnego.

Wydaje się także celowym, aby w przypadku tak dynamicznego środowiska jakim jest koryto na odcinku kulminacji trudno rozmywalnego podłoża aluwiiów, gdzie przebieg procesów erozji i depozycji ma zasadnicze znaczenie dla sprawności instalacji ujmowania wody prowadzić stały monitoring morfodynamiki koryta. System monitoringu powinien obejmować takie elementy jak: miąższości złoża, jego skład, zmiany prędkości przepływu zapewniające jego cykliczną wymianę, a także jakość (charakterystykę) strefy hyporeicznej. Obecnie w Spółce MPWiK nie wszystkie wymienione elementy są kontrolowane. Monitoring miąższości

złoża prowadzony jest jedynie punktowo nad drenami wszystkich ujęć infiltracyjnych w dużych odstępach czasowych, a badania granulometryczne złoża nie są prowadzone wcale.

Przy anizotropowych warunkach hydrogeologicznych, skomplikowanej i urozmaiconej budowie geologicznej oraz zróżnicowanej dynamice przepływu wody w korycie niezwykle istotna jest także odpowiednia lokalizacja ujęć infiltracyjnych oraz znajdujących się w sąsiedztwie obiektów hydrotechnicznych. Budowle te powinny być projektowane tak, aby ich oddziaływanie na morfodynamikę koryta kreowało odpowiednie parametry złoża filtracyjnego.

Eksploatacja ujęć poddennych wymaga teraz ciągłej pracy pogłębiarek i spulchniaczy hydraulicznych poprawiających i naprawiających warunki ujmowania wody spod dna Wisły. Nie do końca znane jest ich oddziaływanie na miąższość złoża, czy na jakość strefy hyporeicznej. Wydaje się zatem wartym zastanowienia poszukiwanie rozwiązań z zakresu budownictwa regulacyjnego, które ograniczyłyby częstotliwość takich ingerencji.

7.6 Możliwości lokalizacji kolejnych ujęć infiltracyjnych na odcinku Wisły warszawskiej

Efektom prowadzonych badań jest ocena obszaru pod kątem kształtującej warunki eksploatacji ujęć infiltracyjnych morfodynamiki koryta. Sformułowane wnioski mogą być przydatne do wskazywania miejsc, które dają nadzieję na niezakłóconą pracę ewentualnych nowych ujęć. Zlokalizowane na badanym odcinku ujęcia PU-1 oraz PU-2 funkcjonują w warunkach zbyt małej miąższości wynikającej z przebiegu nad ich drenami linii nurtu. Podobny problem, ale o mniejszej intensywności dotyczy ujęć uzupełniających UU-1 i 2, a szczególnie stref nad drenami przybrzeżnymi. Strefa stagnacji w sąsiedztwie Ujęcia



Fot. 10 Strefa stagnacji przy Ujęciu Zasadniczym

Zasadniczego wyniku w znacznym stopniu z oddziaływania budowli regulacyjnych, co zostało potwierdzone wynikami modelowania hydrodynamicznego. Rozpoznano je także na zdjęciach lotniczych wykonywanych z niskiego pułapu (*Fot. 10*).

Wraz z dynamicznym rozwojem metropolii warszawskiej oraz negatywnymi skutkami zmian klimatycznych zwiększa się zapotrzebowanie na wodę, co wiąże się z rozwojem istniejących oraz budową kolejnych ujęć infiltracyjnych, których lokalizacja powinna być poprzedzona badaniami (m.in. geologicznymi, modelowymi) określającymi m.in. morfodynamikę odcinka Wisły, na którym planowana będzie eksploatacja. Nowe miejsca powinny spełniać wymieniane wcześniej warunki morfodynamiczne oraz cechować się brakiem występowania problemów eksploatacyjnych rozpoznanych przy obecnie wykorzystywanych ujęciach. Poszukiwania nowych stref perspektywicznych do eksploatacji wody powinny być rozszerzone o inne odcinki Wisły w Warszawie poza „gorsetem warszawskim”. Na analizowanym odcinku brak jest już dogodnych dla kolejnych ujęć miejsc (*Rys. 41 Zał. 8, 9, 10*). Większość powierzchni niecek została już zajęta przez dreny obecnie występujących ujęć. Natomiast, możliwa wydaje się być przebudowa obecnie występujących ujęć zakładająca np. wydłużenie i modernizację sieci drenażu. Warty zaznaczenia jest fakt kontynuowania się niecki II powyżej mostu Siekierkowskiego. Prawdopodobnie jest to kierunek warty rozważenia w perspektywie nadchodzących lat.

8 WNIOSKI

Dotyczące budowy geologicznej i morfodynamiki koryta Wisły na badanym odcinku

1. Istotnym elementem budowy geologicznej odcinka wpływającym na dynamikę przebiegających w jego obrębie procesów fluwialnych jest trudno rozmywalne podłoże aluwiów.
2. Podłoże aluwiów budują głównie gliny morenowe i iły zastoiskowe. Lokalnie spotykane są wychodnie iłów jeziornych neogenu (pliocen), a także skompromowanych utworów sapropelowych/namułów torfiastych. Powierzchnia podłoża aluwiów korytowych pokryta jest warstwą rezydualnego bruku.
3. Rzeźbę powierzchni podłoża określić można jako skomplikowaną. W jej obrębie wydzielono wklęsłe niecki (I i II) oraz wypukła formy: progów (I, II, i III) oraz garbów (I i II).
4. Współczesne aluwia korytowe Wisły to piaski drobne i średnie z przeławiczeniami drobnego żwiru, a także występujące w strefach stagnacji piaski drobne z domieszką pyłu oraz substancją organiczną (do kilkunastu %).
5. Największą miąższość na badanym odcinku mają aluwia korytowe występujące w obrębie niecek – dochodzą one tu do 44 m (w zakresie występowania wyboju – niecka I). Najmniejsze miąższości występują w obrębie na powierzchni progów.
6. Miąższość współczesnych aluwiów korytowych zmienia się wraz z natężeniem przepływu oraz w związku z rzeźbą trudno rozmywalnego podłoża. Największe zmiany miąższości aluwiów zarejestrowano w pobliżu Ujęcia Zasadniczego, a najmniejsze w obrębie występowania progów. Zmiany miąższości aluwiów korytowych są także efektem prac usprawniających pracę ujęcia zasadniczego „Gruba Kaśka”
7. Rozkład prędkości przepływu określony na podstawie modelowania hydrodynamicznego koresponduje z morfologią i litologią podłoża aluwiów. Przy niskich stanach największe prędkości stwierdzono w rejonie garbów utworów trudno rozmywalnych, a najmniejsze w strefach przybrzeżnych za ostrogami.
8. W warunkach stanów niskich w rejonie Ujęcia Zasadniczego - „Gruba Kaśka” tworzy się rozległa strefa stagnacji o prędkościach przepływu nieprzekraczających 0,2 m/s. Małe prędkości przepływu w tej części obszaru w dużej mierze wynikają z obecności ostróg projektowanych dla stanów średnich, które przy stanach niskich istotnie ograniczają przepływ wody, determinując wzmożoną sedymentację materiału drobnoziarnistego, często ze znaczną ilością materii organicznej.

9. Obserwowane obecnie wydłużenie się okresów stanów niskich ogranicza możliwości naturalnej wymiany złoża filtracyjnego oraz wpływa na wzrost udziału w aluwiach korytowych drobnych frakcji. Proces ten wpływać musi na zwiększenie intensywności kolmatacji złoża filtracyjnego oraz drenów ujęć infiltracyjnych.
10. Powierzchnia stropowa podłoża aluwiiów pełni rolę naturalnej bazy erozyjnej, dlatego powinna podlegać ochronie. Na analizowanym odcinku obniżenie powierzchni podłoża aluwiiów nastąpiło w rejonie garbów I i II. Prawdopodobną przyczyną tego była eksploatacja gładów tworzących warstwę rezydualnego bruku.

Dotyczące związku morfodynamiki koryta z warunkami pracy ujęć poddennych

1. Najlepsze warunki dla pracy ujęć występują w miejscach, gdzie miąższości aluwiiów korytowych są największe oraz prędkości przepływu zapewniają stałą wymianę warstwy stanowiącej naturalne złoże filtracyjne. Strefami takimi są: głęboka niecka w pobliżu „Grubej Kaśki” oraz rozległy obszar w okolicach mostu Siekierkowskiego i prawobrzeżnych studni infiltracyjnych (UU-1, UU-2).
2. Strefy tranzytowe koryta, gdzie prędkości przepływu są największe nie nadają się do lokalizacji ujęć ze względu na brak stałej warstwy aluwiiów korytowych o odpowiedniej i stabilnej miąższości. Miejscami takimi cechach są strefy progów i garbów. Problem związany z niewystarczającą miąższością złoża obserwowany jest głównie nad drenami ujęć PU-1 oraz PU-2, które znajdują się na przebiegu linii nurtu.
3. Posadowienie drenów w wykopie wykonanym w powierzchni trudno rozmywalnego podłoża jest niewskazane przede wszystkim ze względu na konieczność ochrony stropu podłoża aluwiiów, który pełni funkcję lokalnej bazy erozyjnej. Jej obniżenie może spowodować zmiany morfologii koryta powyżej takich miejsc.
4. Niewskazanym miejscem dla budowy ujęcia są strefy wychodni w podłożu współczesnych aluwiiów gruntów organicznych. Przykładem mogą być skonsolidowane, prawdopodobnie środkowo holocenijskie lub starsze utwory sapropelowe i torfy występujące m.in. w strefach przybrzeżnych w części centralnej badanego obszaru między ujęciem PU-2 a PU-3. Domieszka substancji organicznej może znacząco utrudnić proces uzdatniania eksploatowanej wody.
5. Nieodpowiednie są dla lokalizacji nowych ujęć także strefy stagnacji wód. Deponowane tu namuły mogą powodować zanieczyszczenie eksploatowanych wód substancją

organiczną. Ich obecność wpływa także na pogorszenie warunków infiltracji wód rzecznych.

6. Strefy stagnacji występują m.in. w okolicach „Grubej Kałki”, szczególnie podczas niskich stanów. Potwierdzają to wcześniejsze doniesienia z MPWiK o problemach ze zmniejszeniem ilości oraz pogorszeniem jakości ujmowanej wody z drenów (14, 15, 16). Ich konsekwencją było nawet czasowe ich wyłączenie.
7. Praca ujęć infiltracyjnych powoduje zmianę relacji między wodami powierzchniowymi i podziemnymi, zmieniając pierwotny charakter odcinka koryta z drenującego na infiltrujący. W zasięgu oddziaływania ujęcia wartości gradientu hydraulicznego przyjmują wartości ujemne (-0,71 – 0) świadczące o infiltracji.
8. Zmiana dynamiki wód podziemnych w strefie analizowanych ujęć może być potęgowana występowaniem w podłożu aluwiiów kulminacji zbudowanych z utworów praktycznie nieprzepuszczalnych (według klasyfikacji Pazdry 1977).
9. W miejscach oddziaływania ujęć, istnieje zwiększone prawdopodobieństwo intensyfikacji kolmatacji oraz konsolidacji utworów tworzących naturalne złoża filtracyjne poprzez wzmożenie procesu infiltracji wód powierzchniowych (rzecznych).

9 LITERATURA:

- **Allan J. D. 1998** „Ekologia wód płynących.” Wyd. Naukowe PWN, Warszawa
- **Allan J. D., Castillo M. M., Capps K. A. 2021** "Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters" 2nd ed. New York: Springer
- **Allen J. R. 2000** „Morphodynamics of Holocene salt marshes: a reviewsketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe” *Quaternary Science Reviews* 19 (17-18): 1839-1840
- **Andrzejewska A. 2007** „Porównanie terminów początku i końca okresu ewapotranspiracji z wód podziemnych z meteorologicznymi okresami wegetacji.” *WPH*, 13 (2): 233–241. **BRUNKE M., GONSER T. 1997** – The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshw. Biol.*, 37: 1–33.
- **Arkuszewski A. 1985** „Monografia dróg wodnych śródlądowych w Polsce”, , Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. WKiŁ, Warszawa
- **Bahadori A. 2016** „Essentials of Oil and Gas Utilities, Process Design, Equipment, and Operations”, Gulf Professional Publishing
- **Bajda M., Falkowski T. 2014** Badania geotechniczne w ocenie budowy geologicznej fragmentu Skarpy Warszawskiej w rejonie ulicy Tamka; *Landform Analysis* 26: 77–84
- **Banach M. 1994** Morfodynamika strefy brzegowej zbiornika Włocławek” *prace Geograficzne* 161: 1-180
- **Bażyński J. 1996** „Eksploatacja wód z utworów oligoceńskich w rejonie Warszawy”, *Przegląd Geologiczny*, vol 44, nr 4, PIG, Warszawa
- **Biernacki Z. 1971** Holoceńskie i późnoplejstocieńskie aluwia Wisły w rejonie Warszawy; streszczenia referatów z konferencji “Holoceńska paleogeografia dolin rzek dorzecza Wisły”; Komitet Badań Czwartorzędu PAN
- **Biernacki Z. 2000** „Geomorfologia i wody powierzchniowe. [w:] *Wisła w Warszawie*”. Biuro Zarządu m.st. Warszawy. Wydział Planowania Przestrzennego i Architektury, Warszawa, 180
- **Bliźniak W., Marynowicz-Puchalska E. 2016** „Wodociągi warszawskie, alfabet fotograficzny wydany z okazji jubileuszu 130-lecia”, MPWik w m.st. Warszawie S.A.

- **Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R. A. P., Merz B., Arheimer B., Aronica G. T., Bilibashi A., Bonacci O., Borga M., Čanjevac I., Castellarin A., Chirico G. B., Claps P., Fiala K., Frolova N., Gorbachova L., Gül A., Hannaford J., Harrigan S., Kireeva M., Kiss A., Kjeldsen T. R., Kohnová S., Koskela J. J., Ledvinka O., Macdonald N., Mavrova-Guirguinova M., Mediero L., Merz R., Molnar P., Montanari A., Murphy C., Osuch M., Ovcharuk V., Radevski I., Rogger M., Salinas J. L., Sauquet E., Šraj M., Szolgay J., Viglione A., Volpi E., Wilson D., Zaimi K., Živković N. 2017** „Changing climate shifts timing of European floods.” *Science* 357, 588–590
- **Błażejczyk K. i in. 2014** „Miejska wyspa ciepła w Warszawie uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne” PAN, Warszawa
- **Bogdanowicz, E., Fal, B., Dobrzyńska, I. 2000** „Charakterystyki hydrologiczne [w:] *Wisła w Warszawie*”. Biuro Zarządu m.st. Warszawy, Wydział Planowania Przestrzennego i Architektury. Warszawa (maszynopis),9–13
- **Boulton A. J., Findlay S., Marmonier P., Stanley E. H., Vallett H. M. 1998** “The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers.” *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29, 59–81
- **Bretschko G. 1992** “The sediment fauna in the uppermost parts of the impoundment “Altenwörth” (Danube, stream km 2005 and 2007).” *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 84, 131–168
- **Brunke M., Gonser T. 1997** “The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater.” *Freshwater Biol.* 37, 1–33
- **Brunke M., Gonser T., Grieder E. 1998a** “Influence of surface and subsurface flow on distribution of particulate organic matter and inorganic fine particles in perialpine stream sediments.” [W:] *Conf. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*: 371–378
- **Brunke M., Gonser T., Grieder E. 1998b** “Environmental gradient patterns in hyporheic interstices: A model based on hydrological exchange processes.” [w:] *Advances in River Bottom Ecology*. Bretschko G, Helesic J. (red). Backhuys, Leiden, 23–30
- **Brykczyńska E., Brykczyński M. 1974** „Geologia przekopu Trasy Łazienkowskiej na tle problematyki osadów trzeciorzędu i czwartorzędu w Warszawie.” *Pr. Muz. Ziemi*, 22: 199–218

- **Cygański K., Woźniak E. 1997** „Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50k, ark. Warszawa Wschód (524)”, MOŚZNiL, Warszawa
- **Cygański K., Woźniak E. 1997** „Objaśnienia do Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50k, ark. Warszawa Wschód (524)”, MOŚZNiL, Warszawa
- **Danielopol D. L. 1989** “Groundwater fauna associated with riverine aquifers.” *J. North Am. Bentol. Soc.* 8, 18–35
- **Dębski, K. 1961** „Charakterystyka hydrologiczna Polski”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Łódź–Warszawa
- **Dobek M. 2007** „Reakcja zwierciadła wód podziemnych na opad atmosferyczny w latach 1961–1981 w wybranych punktach Wyżyny Lubelskiej.” *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin–Polonia, Sekcja E, LXII*: 49–55
- **Dojlido J. R. 1995** „Chemia wód powierzchniowych”, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok
- **Dziedziczak R. 2006** „Antropomineralne wody źródeł Warszawy”, *Przegląd Geologiczny*, vol. 54, nr 11, PIG, Warszawa
- **Edwards R.T. 1998** “The hyporheic zone.” [w:] *River Ecology and Management*. Naiman R. J., Bilby R. E. (red.). *Lessons From the Pacific Coastal Ecoregion*. Springer, New York, 399–429
- **Edwardson K. J., Bowden W. B., Dahm C., Morrice J. 2003** “The hydraulic characteristics and geochemistry of hyporheic and parafluvial zones in Arctic tundra streams, north slope, Alaska.” *Adv. Water Resources* 26, 907–923
- **Esri. 2023** Spline interpolation. ArcGIS Pro Documentation. Environmental Systems Research Institute. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm>
- **Fal B., Dąbrowski P. 2001** „Dwieście lat obserwacji i pomiarów hydrologicznych Wisły”, *Przepływy Wisły w Warszawie* "Gospodarka Wodna, Nr 12, pp. 503-510.
- **Falkowska E., Falkowski T. 2015** “Trace metals distribution pattern in floodplain” *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(7), 876-887. doi:10.1002/esp.3680
- **Falkowski E. 1982** “Some regularities of the valley floor evolution of the Middle Vistula river valley”. In: L. STARKEL, “Evolution of the Vistula river valley during the last 15 000 years” *Geographical Studies, Special Issue 1, IGiPZ PAN*, 9-20

- **Falkowski E. 1990** „Morphogenetic classification of river valleys developing in formerly glaciated areas for needs of mathematical and physical modelling in hydrotechnical projects” *Geographia Polonica*, vol. 58, 55-67
- **Falkowski E., Krauzulis K., Granacki W., Falkowski T., Bieganowski R. 1993** „Badania litologii i morfologii stropu gruntów trudno rozmywalnych oraz miąższości aluwów pod ujęcia PU-4 i PU-5, jak też cech geotechnicznych na trasie doprowadzalnika, Zakład Badań Geologicznych dla Budownictwa, Warszawa
- **Falkowski E., Krauzulis K., Granacki W., Falkowski T., Bieganowski R. 1992** „Mapa stropu gruntów trudno rozmywalnych wraz z ich litologią w korycie Wisły”, Zakład Badań Geologicznych dla Budownictwa, Warszawa
- **Falkowski E., Laskowski K. 1978** „Wpływ erozji i sedymentacji w korycie Wisły na odcinku od ujścia Pilicy do ujścia Narwi na morfologię stropu gruntów trudno rozmywalnych (w aspekcie poboru kruszywa)”
- **Falkowski T., Kiedryńska L., Nowak B., Pacholec B., Złotoszewska- Niedzialek H. 2004** Jakość wód eksploatowanych ujęciem poddennym w Warszawie; *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, XIII, 29, 2, 126-137
- **Falkowski T. 2001** “Zróżnicowanie struktur wodonośnych w dolinach rzecznych na Niziu Polskim i jego wpływ na warunki lokalizacji ujęć i ochronę wód”
- **Falkowski T. 2006** „Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły środkowej”, Wydawnictwo SGGW, Warszawa
- **Falkowski T., Bujakowski F., Ostrowski P., Bartold P. 2022** „Ekspertyza dotycząca występowania utworów organicznych w korycie Wisły w rejonie projektowanego ujęcia poddennego MPWiK w Warszawie (rejon kilometra 509)”, Geoscan, Ołdakowizna
- **Falkowski T., Ostrowski P. 2009** „Budowa geologiczna strefy korytowej Wisły Warszawskiej i jej znaczenie dla związanej z korytem infrastruktury”, *Nauka Przyroda Technologie*, Poznań
- **Feofanov Y.A., Riakhovskii M. 2018** “Features of the use of water intakes infiltration type”, *Voda*, 8/132 (po rosyjsku)
- **Fowler R. T., Death R. G. 2001** “The effect of environmental stability on hyporheic community structure.” *Hydrobiologia* 445, 85–95.

- **Franken R. J. M., Storey R. G., Williams D. 2001** “Biological, chemical and physical characteristics of downwelling and upwelling zones in the hyporheic zone of a north-temperate stream.” *Hydrobiologia* 444, 183–195
- **Frankowski Z., i in. 2000** „Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy, Warszawa
- **Fraser B. G., Williams D. D. 1998** “Seasonal boundary dynamics of a groundwater/surface water ecotone.” *Ecology* 79, 2019–2031
- **Hancock Fraser B. G., Williams D. D., Howard K. W. F. 1996** “Monitoring biotic and abiotic processes across the hyporheic/groundwater interface.” *Hydro-Geol. J.* 4, 36–50
- **Gabryszewski T, Wiczysty A. 1985** „Ujęcia wód podziemnych”, Arkady Warszawa
- **Gibert J. 1992** “Groundwater ecology from the perspective of environmental sustainability. Proceedings of the First International Conference on Groundwater Ecology.” [w:] American Water Resources Association. Stanford J. A., Simons J. J. (red.). Bethesda, Md, 3–13
- **Gribovski Z., Kalicz P., Kucsara M. 2006** “Streamflow characteristics of two forested catchments in Sopron Hills.” *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 2: 81–92
- **Gutry-Korycka, M., Magnuszewski, A., Suchożeberski, J., Jaworski, W., Marcinkowski Szydłowski, M. 2006** Numerical Estimation of Flood Zones in the Vistula River Valley, Warsaw, Poland. 308. *Int. Assoc. Hydrol Sci Publ*, pp. 191–195
- **Hahn H. J. 2005** “Unbaited phreatic traps: A new method of sampling stygofauna.” *Limnologica* 35, 248–261
- **Hahn H. J., Matzke D. 2005** “A comparison of stygofauna communities inside and outside groundwater bores.” *Limnologica* 35, 31–44
- **Hancock P. J. 2002** “Human impacts on the streamgroundwater exchange zone. *Environ. Manage.* 29, 763–781
- **Heidrich Z. 1999** “Wodociągi i kanalizacja – tom 1”, WSiP, Warszawa
- **Hjulström F. 1935** Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fryis. *Bull. Geol. Inst. Uppsala*, 25: 221–527

- **Hoehn E. 1998** “Solute exchange between river water and groundwater in headwater environments.” Conf. Hydrology. Water Resources and Ecology in Headwaters 248, 165–171
- **Hofkes E. i in. 1983** “Small Community Water Supplies”, IRC Technical Paper No 18,
- **Jacewicz A., Kuźniar P. 2000** „Zarys historyczny kształtowania się doliny i koryta Wisły na odcinku Warszawskim”
jakość wody infiltracyjnej ujmowanej przez Wodociąg Praski”. Ochrona Środowiska, 3 (25), 77-81
- **Janczewski H., 1971** Geneza i rozwój inżynierii miejskiej. Warszawa: Arkady, s. 126, Warszawa
- **Jekatierynczuk-Rudczyk E. 2005** „Transformacja składu chemicznego wody w strefie źródeł niskich.” Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce. Burchard J. (red.). Tom III, UŁ, Łódź, 259–268.
- **Jekatierynczuk-Rudczyk E. 2007** „Strefa hyporeiczna, jej funkcjonowanie i znaczenie.” Kosmos Problemy nauk biologicznych, Tom 56, 181-196
- **Jones J. R., Jeremy B. L., Holmes, R. M. 1996** “Sur- face–subsurface interactions in stream ecosys- tems.” Trends Ecol. Evol. 11, 239–242
- **Kaznowska E., Wasilewicz M. 2020** „Historyczne niżówki na Wiśle w Warszawie na tle aktualnych stanów i przepływów niskich”, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2020
- **Kaznowska, E., Hejduk, A., Kempieński, C. 2018** The Vistula river low flows in Warsaw in the 21st century. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus
- **Koczko B., Mossakowska A., Pacholec B. 1997** „Kierunki modernizacji Wodociągu Praskiego w Warszawie”, Ochrona Środowiska, 4(67)
- **Koczko B., Pacholec B., Mossakowska A. 1995** „Doświadczenia eksploatacyjne ujęcia infiltracyjnego Wodociągu Praskiego w Warszawie”, Ochrona Środowiska, 3(58)
- **Kominek E. 2015** „Ptaki nad Warszawską Wisłą”, https://wislawarszawska.pl/wp-content/uploads/2015/09/ulotka_Ptaki_nad_Wisla.pdf
- **Kondracki J. 2002** „Geografia regionalna Polski”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

- **Kornacki Z. 1960** „Przyczyny obniżania się dna Wisły w Warszawie”. *Gospodarka Wodna*, nr. 7, 305-307, Warszawa
- **Kotowski A. 1986**, „Analiza porównawcza metod obliczania wydajności poddennych ujęć promienistych wody”, Wyd. PZITS, Wrocław
- **Kowal A. 1999** „Wykorzystanie infiltracji w oczyszczaniu wody”, *Ochrona Środowiska* 3/7
- **Kowal A. Świdorska-Bróz M., 2000** „Oczyszczanie wody” Wyd. Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław
- **Kowalski, H., Magnuszewski, A., Radecki-Pawlik, A. 2018** “The application of two-dimensional hydrodynamic models for underwater archaeological finds from the Vistula River in Warsaw, Poland”, *Hydrological Processes*, 32 (18), 2888–2900
- **Kuźniar P. 1997** Woda 500-letnia w Warszawie w świetle materiałów historycznych i symulacji komputerowych, *Forum Naukowo-Techniczne – Powódź 1997; Wstępna ocena przyczyn, rozmiarów i skutków*, Ustroń, IMGW Warszawa, 143-155
- **KZGW 2023** „Plan gospodarowania wodami na obszarze dorzecza Wisły”. Warszawa
- **Leopold L., Gordon Wolman M., Miller J.P. 1964** “Fluvial processes in geomorphology”, Dover Publications, INC., New York
- **Lickiewicz J., Pawlak J., Pietrusiewicz W. 2000** „Wisła w Warszawie”, Dom Wydawniczy ELIPSA, Warszawa
- **Macioszczyk A., Dobrzyński D. 2007** „Hydrogeochemia aktywnej wymiany wód podziemnych”, Wydawnictwo PWN, Warszawa
- **Macioszczyk A., Grochowski D., Porębska G. 1991** „Zanieczyszczenia antropogeniczne wód w źródłach lewobrzeżnej Warszawy.” *Współczesne problemy hydrogeologii* nr 48. PIG, Warszawa
- **Magnuszewski A., Gutry-Korycka M. 2009** Rekonstrukcja przepływu wielkich wód Wisły w Warszawie w warunkach naturalnych. *Pr. i Stud. Geogr.*, 43: 141–151.
- **Magnuszewski A., Gutry-Korycka M., Mikulski Z. 2012** „Historyczne i współczesne warunki przepływu wód wielkich Wisły w Warszawie cz. I i II.” *Gosp. Wodna*, 1: 9–17
- Mapa topograficzna okolic Warszawy WIG 1924 r.
- **Marciniak M., Chudziak Ł. 2015** „Nowa metoda pomiaru współczynnika filtracji osadów dennych”, *Przegląd Geologiczny*, vol. 63, nr 10/2, Warszawa

- **Marciniak M., Gebler D., Grygoruk M., Zalewska-Galosz J., Szoszkiewicz K. 2023** „Hyporheic flow in aquatic *Ranunculus* habitats in temperate lowland rivers in Central Europe”, *Ecological Indicators*, Volume 153 – September, Elsevier
- **Marciniak M., Szczucińska A., Kaczmarek M. 2017** „Zmienność współczynnika filtracji w strefie hyporeicznej w świetle badań laboratoryjnych.” *Przegląd Geologiczny*, vol. 65, nr 11/1, 1115-1120
- **Mazurek M., Szpikowska G., Kruszyk R. 2016** „Transformacja składu chemicznego wód podziemnych w niszach źródłiskowych na obszarach młodoglacjalnych (Dorzecze Parsęty)”, *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, 20: 355–369
- **Migoń P. 2013** „Geomorfologia”, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa
morphodynamics; *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, no 7, 876-
- **Mossakowska, A., Pacholec, B., & Nowak, B. 2003** "Wpływ stanów wody w Wiśle na jakość wody infiltracyjnej ujmowanej przez Wodociąg Praski." *Ochrona Środowiska*, vol. 25, no. 3, pp. 77-80
- **Nawrocki J. 2010** „Uzdatnianie wody, procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- **Nocoń W. 2017** „Zawiesina w wodach płynących aglomeracji górnośląskiej–problemy i wyzwania”, *LAB Laboratoria, Aparatura, Badania*, 2017/22/16, Katowice
- **Olejnik A. 2018** „Ocena jakości wody produkowanej w Zakładzie Centralnym SUW Filtry w Warszawie. Czy możliwa jest rezygnacja z dezynfekcji chemicznej?”, Praca doktorska, Poznań, Uniwersytet Adama Mickiewicza, Wydział Chemii
- **Olesn D. A., Townsend C. R. 2003** “Hyporheic community composition in a gravel-bed stream: influence of vertical hydrological exchange, sediment structure and physicochemistry.” *Freshwater Biol.* 48, 1363–1378
- **Pacholec B., Wąsowski J., Dąbrowska E., Krekora B., Nowak B. 1999** „Analiza pracy ujęć infiltracyjnych Wodociągu Praskiego w Warszawie”, *Ochrona Środowiska* 3(74)
- **Pacholec B., Zdanowicz A. 2008** „Problemy eksploatacji warszawskich ujęć infiltracyjnych w aspekcie postępującego ocieplenia klimatu”, *Zaopatrzenie w wodę*,
- **Paczyński B., Sadurski A. red. nauk. 2007** „Hydrogeologia regionalna Polski”, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa

- **Pasieczna A., Kostrz-Sikora P., Witkowska A., Wolkowicz S. 2005** „Program ochrony środowiska miasta stołecznego Warszawy” *Przegląd Geologiczny*, vol 53, nr 10/1, 2005
- **Pazdro Z. 1964** „Hydrogeologia ogólna”, Wyd. Geol., Warszawa
- **Pennak R. W., Ward J. V. 1986** “Interstitial fauna communities of the hyporheic and adjacent groundwater biotopes of a Colorado mountain stream.” *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 74, 356–396
- **Piórkowski P. i in. 2013** „Mapa Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:10 000”, Kraków
- **Popek M., Wapińska B. 2009** „O instalacjach sanitarnych najkrócej”, WSiP, Warszawa
- **Popek Z., Falkowski T., Ostrowski P. 2009** „Analiza potrzeb i możliwości przebudowy koryta Wisły w Warszawie.” *Nauka Przyroda Technologie*, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, dział: Melioracje i Inżynieria Środowiska, 3 (3): 97.
- **Pozaryski W. 1956** „Podział strukturalno-geologiczny Polski jako podstawa badań. *Przegl. Geol.* nr 6
- **Pozaryski W. 1964** „Podział Polski na jednostki tektoniczne. *Przegl. Geol.* nr 2
- „Program ochrony środowiska miasta stołecznego Warszawy na lata 2021-2024”, 2021, Rada Miasta Stołecznego Warszawy, Warszawa
- **Rabczewski W., Rutkowski S. 1937**, „Wodociągi i kanalizacja m. st. Warszawy 1886 – 1936”, Zakłady Graficzne B. Wierzbicki i s-ka, Warszawa
- **Richling A, i in. 2021** *Regionalna geografia fizyczna Polski*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań
- **Romanowski J. 2017** „Inwentaryzacja, ocena i koncepcja modernizacji elementów systemu biernej ochrony przeciwpowodziowej Warszawy od strony rzeki Wisły i jej dopływów.”, wagabart.republika.pl, Warszawa
- **Różycki S.Z. 1972** „Nizina Mazowiecka” [w:] Galon R. [red.] „Geomorfologia Polski” t.2 „Niż Polski” PWN, Warszawa, 271-317
- **Różycki S.Z., Sujkowski Z. 1936** „Profile geologiczne przez Warszawę”. Zarząd Miejski w Warszawie
- **Ruszczyńska-Szejnach H. 1998** „Struktura glin lodowcowych jako istotny wskaźnik ich genezy” [W:] E. Mycielska-Dowgiałło (red.), *Struktury*

sedymenacyjne i postsedymenacyjne w osadach czwartorzędowych i ich wartość interpretacyjna. UW, WGiSR, Warszawa, 13-57

- **Sarnacka Z. 1980** „Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, Arkusz Warszawa Wschód (524)”
- **Schwoerbel J. 1967** „Das hyporheische interstitial als Grenzbiotop zwischen oberirdischem-und subterranem Ökosystem und seine bedeutung für die Primär-Evolution von Kleinsthöhlenbewohnern.” Arch. Hydrobiol. Suppl. 33, 1–62
sediments of a lowland river in relation to contemporary valley bottom
- **Sikorska D. 2014** „Zróżnicowanie i kierunki zmian roślinności starorzeczy Wisły w okolicach Warszawy”, praca doktorska, SGGW, Warszawa
- **Skibiński J. 1994** „Piasek i woda”; artykuł wydrukowany w dodatku do Życia Warszawy.
- **Słoniowa A. 1981** „Sokrates Starynkiewicz”, Sylwetki Warszawskie, Państwowe Wydawnictwo Naukowe. ISBN 83-01-02798-3, Warszawa
- **Stachy J. red. 1986** „Atlas hydrologiczny Polski, tom 1 i 2”, IMiGW, Warszawa
- **Starkel L. 2001** „Historia doliny Wisły”, PAN, IGiPZ, Warszawa
- **Stupnicka E. 1997** „Geologia regionalna Polski” Wyd.UW, Warszawa, 1-348
- **Szoszkiewicz K., Budka A., Kayzer D., Pietruczuk K. 2014** “Diversity of macrophyte communities and their relationship to water quality in different types of lowland rivers in Poland.” Hydrobiologia, 737: 77–85
- **Tomczyk M., Bednorz E. 2022** „Atlas klimatu Polski”, Boguski Wydawnictwo Naukowe, Poznań
- **Treonis A. M., Wall D. H., Ross A. W. 1999** “Invertebrate biodiversity in antarctic dry valley soils and sediments.” Ecosystems 2, 482–492
- **Triska F. J., Kennedy V. C., Avanzino R. J., Zellweger G. W., Bencala K. E. 1989** “Retention and transport of nutrients in a third order stream: hyporheic processes.” Ecology 70, 1877–1892
- **Twardowski K, Drożdżak R. 2006** „Pośrednie metody oceny właściwości filtracyjnych gruntów”, Wydawnictwa AGH, Kraków
w Warszawie. Obserwacje stanów wody”, Gospodarka Wodna, 11, 461-467.
- **W.H. Lindley, A. Grotowski, 1911** Kanalizacja, wodociągi i pomiary miasta Warszawy, Warszawa

- **Watycha L. 1973** Uwagi o budowie geologicznej „Trasy Łazienkowskiej” w Warszawie. *Przegląd Geologiczny* 8/9: 458–465
- **Wierzbicki G., Ostrowski P., Bartold P., Bujakowski F., Falkowski T. 2021** “Urban geomorphology of the Vistula River valley in Warsaw”, *Journal of Maps*
- **Williams D. D. 1984** “The hyporheic zone as a habitat for aquatic insects and associated arthropods.” [w]: *The Ecology of Aquatic Insects*. Rosenberg D. M., Resh V. H. (red.). Praeger Publishers, New York, 430–455
- **Williams D. D. 2003** “The brackishwater hyporheic zone: invertebrate community structure across a novel ecotone.” *Hydrobiologia* 510, 153–173
- **Winter T. C. 1999** “Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems.” *J. Hydrol.* 7, 28–45
- **Wojciechowska E., Nawrot N., Walkusz-Miotk J., Matej-Łukowicz K., Pazdro K. 2019** “Heavy Metals in Sediments of Urban Streams: Contamination and Health Risk Assessment of Influencing Factors”
- **Woś A. 1993** „Regiony klimatyczne Polski w Świetle częstości występowania różnych typów pogody”, PAN, Warszawa
- **Woś A. 1999** „Klimat Polski”, PWN, Warszawa
Wydawnictwo Państwowego Instytutu Geologicznego
- **Wysokiński L. i in. 1999** *Warszawska Skarpa Śródmiejska od Al. Jerozolimskich do ul. Sanguszki*. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa
- **Wyszkowski K., Matlak M., Grunwald A., Stefańczyk J. 1993** „Infiltracyjne poddenne promieniste ujęcie wody nowej generacji”, Wyd. PZITS, Wrocław
- **Zielińska M. 1960** „Zmiana niwelety Wisły w Warszawie na tle zmian profilu podłużnego środkowej Wisły”, *Gospodarka Wodna* Nr 11, 477-480
- **Żelaziński, J., Barański J., Kadłubowski A., Wereski S. 2005** „Application of the CCHE Models for Explanation of Factors Causing Deep Erosion of Vistula River Bed in Warsaw.” *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., E-5 (387):* 87–113
- **Żelazo J., Kowalska A., Okruszko T., Popek Z. 2023** „The morphological changes of river bed on the Vistula River reach in 19th and 20th century”, *Przedstawione na konferencji IAHR, 16-21 września 2002 roku, obejmujące strony 1-11 materiałów konferencyjnych*

Strony internetowe:

- danepubliczne.imgw.pl/
- emergency-wash.org/water/en/technologies
- epsh.pgi.gov.pl/
- e-warsaw.pl/
- fotopolska.eu
- geolog.pgi.gov.pl/
- geoportal.gov.pl
- gis.stackexchange.com
- gisresources.com
- imgw.pl/wydarzenia/charakterystyka-wybranych-elementow-klimatu-w-polsce-w-2022-roku-podsumowanie
- mapa.um.warszawa.pl
- mpwik.com.pl
- pgi.gov.pl/
- pro.arcgis.com
- pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm
- staremapy.waw.pl/
- ukosne.um.warszawa.pl
- warszawa.stat.gov.pl/warszawa/
- warszawskakranowka.pl
- wislawarszawska.pl

Spis ilustracji:

Rys. 1 Lokalizacja terenu badań na tle fizycznogeograficznego podziału Polski	4
Rys. 2 Obszar badań na tle jednostek geomorfologicznych.....	5
Rys. 3 Gorset Warszawski (Falkowski 1982)	6
Rys. 4 Wycinek szkicu ukształtowania podłoża czwartorzędu (Sarnacka 1980).....	7
Rys. 5 Fragment schematycznego, podłużnego przekroju geologicznego strefy korytowej Wisły w okolicach Warszawy (Falkowski 1990)	8
Rys. 6 Fragment mapy geologicznej powierzchni podłoża holocenijskich aluwii Wisły warszawskiej wraz z jej izoliniami (Falkowski i in. 1992)	10
Rys. 7 Przekrój geologiczny, poprzeczny przez Wisłę, powyżej ujęcia głównego – Grubej Kaśki (Falkowski, Ostrowski 2009)	11
Rys. 8 Mapa hydroizohips z zaznaczonym zasięgiem jednostek hydrogeologicznych okolic obszaru badań (Cyganski, Woźniak 1997).....	13
Rys. 9 Wycinek mapy topograficznej okolic Warszawy WIG 1924 r. z widocznym przebiegiem ówczesnej Wilanówki (staremapy.waw.pl).....	16
Rys. 10 Fragment mapy hydrograficznej Warszawy (Pietrusiewicz i in., 2000).....	16
Rys. 11 Porównanie położenia brzegów Wisły w 1934 ze stanem obecnym (przebieg brzegów Wisły: mapa.um.warszawa.pl, podkład fotograficzny: ukosne.um.warszawa.pl)	17
Rys. 12 Hydrogram stanów i przepływów dla wodowskazu Warszawa-Bulwary (lata hydrologiczne 2019-2022), (opracowanie na podstawie danych z IMiGW).	23
Rys. 13 Charakterystyka i typy zabudowy Warszawy (fragment), (Pietrusiewicz W. 2000)..	26
Rys. 14 Kormoran (<i>Phalacrocorax carbo</i>).....	26
Rys. 15 Schemat ujęcia nurtowe – ssawnego (Kalisz 1994).....	30
Rys. 16 Schemat ujęcia nurtowego – grawitacyjnego (Kalisz 1994).....	30
Rys. 17 Schemat ujęcia brzegowego – komorowego (Kalisz 1994).....	30

Rys. 18 Schemat ujęcia wieżowego (Heidrich 1999)	31
Rys. 19 Rodzaje ujęć zatokowych (Heidrich i in. 1977).....	31
Rys. 20 Schemat ujęcia wody z zatokami przybrzeżnymi i osadnikiem ziemnym (Heidrich i in. 1977).....	32
Rys. 21 Plan Stacji Pomp Rzecznych, 1 – ujęcia zatokowe zbudowane w 1906 r. (Lindley, Grotowski 1911), 2 –osadnik oddany do użycia w 1924 r. (Rabczewski, Rutkowski 1937) ..	32
Rys. 22 Przykłady ujęć wykorzystujących infiltrację wymuszoną(Gabryszewski, Wieczysty, 1985).....	34
Rys. 23 Przykłady ujęć wykorzystujących infiltrację sztuczną oraz naturalną (Gabryszewski, Wieczysty, 1985).....	35
Rys. 24 Schematy studni infiltracyjnych, promienistych: g, h, (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)	35
Rys. 25 Schematy studni infiltracyjnych, promienistych: i, j (Gabryszewski, Wieczysty, 1985)	36
Rys. 26 Strefy dystrybucji wody produkowanej przez MPWiK dla aglomeracji warszawskiej – 2024 rok (mpwik.com.pl).....	42
Rys. 27 Schemat konstrukcji ujęcia „Gruba Kaśka” (Kowal, Świdarska-Bróz., 2000).....	45
Rys. 28 Schemat ułożenia drenów Ujęcia Zasadniczego	46
Rys. 29 Schemat ułożenia drenów ujęć UU-1 i UU-2	48
Rys. 30 Schemat ułożenia drenów ujęć PU-1 i PU-2.....	50
Rys. 31 Schemat ułożenia drenów Ujęć PU-3 i PU-4.....	50
Rys. 32 Ścieżka przelotu autonomicznego oraz model wykorzystanego drona.....	57
Rys. 33 Schemat konstrukcji gradientomierza;.....	57
Rys. 34 Fragment roboczej ortofotomapy	59
Rys. 35 Przykład fragmentu chmury punktów wykorzystanych do utworzenia mapy hipsometrycznej	62
Rys. 36 Schemat działania metody interpolacji typu Spline.....	62
Rys. 37 „Chmury” punktów pomiarów batymetrycznych (ścieżki echosondaży).....	63
Rys. 38 Schemat obliczeń objętości aluwiiów	67
Rys. 39 Mapy hipsometryczne dna	71
Rys. 40 Mapa hipsometryczna stropu utworów trudno rozmywalnych.....	74
Rys. 41 Podłużny przekrój geologiczny	76
Rys. 42 Mapy rozkładu miąższości aluwiiów	77
Rys. 43 Różnica miąższości map B i C.....	78
Rys. 44 Mapa rozkładu gradientu hydraulicznego.....	81
Rys. 45 Mapy rozkładu prędkości w korycie przy różnych warunkach przepływu	83
Rys. 46 Wpływ obecności garbu II na prędkość przepływu	84
Rys. 47 Strefa stagnacji (b) przy Ujęciu Zasadniczym oraz „cień” za „Gruba Kaśką”	85

Spis fotografii:

Fot. 1 Powódź w maju 2010 roku (1 - fot. M. Jankowski, 2 – fot. Ł. Trąbiński)	20
Fot. 2 Pozostałość skorodowanego drenu	44
Fot. 3 Ujęcia uzupełniające UU-1 i UU-2 (1. Rok 1971, fot. – fotopolska.eu, 2. Rok 2024, fot. P.Bartold)	48
Fot. 4 Chudy Wojtek II na tle Ujęcia Zasadniczego – Grubej Kaśki (fot. P. Bartold, 2022)..	52
Fot. 5 Chudy Wojtek III podczas gaszenia pożaru mostu Łazienkowskiego w nocy z 14 na 15.02.2015 r. (Fot. S. Starnawski).....	52
Fot. 6 Głowica pogłębiarki „SAWA” (fot. D. Kowalczyk, 2016)	52

Fot. 7 Echosonda OHMEX Sonarlite (1 – fot P.Ostrowski 2018) i odbiornik RTK DGPS Trimble	55
Fot. 8 Łódź pontonowa typu „RIB” z silnikiem spalinowym na tle budynku Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie (fot. P.Bartold 2021)	55
Fot. 9 Autor niniejszej pracy podczas wykonywania badań terenowych z wykorzystaniem gradientomierza, po lewej dr P. Ostrowski	58
Fot. 10 Strefa stagnacji przy Ujęciu Zasadniczym.....	92

Spis wykresów:

Wyk. 1 Zależność prędkości średniej i maksymalnej przepływu stanu wody od	81
---	----

Spis tabel:

Tab. 1 Statystyki klimatyczne dla stacji Warszawskiej z dwóch kolejnych trzydziestolecia referencyjnych.....	19
Tab. 2 Termiczna i opadowa klasyfikacja lat (1971-2022) dla stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie.....	20
Tab. 3 Średnie roczne temperatury i opady dla stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie (lata 2018-2022)	21
Tab. 4 Wartości przepływów charakterystycznych dla trzech wodowskazów zlokalizowanych najbliżej m.st. Warszawa (Żelazo i in., 2023).....	22
Tab. 5 Miąższość i objętość aluwii przy danym stanie i przepływie	78
Tab. 6 Wydajności dobowe ujęć infiltracyjnych w wymienionych dniach	80

Spis załączników:

Zał. 1 Przekrój hydrogeologiczny (Cygański K., Woźniak E., 1997).....	112
Zał. 2 Mapa hipsometryczna A	113
Zał. 3 Mapa hipsometryczna B	114
Zał. 4 Mapa hipsometryczna C.....	115
Zał. 5 Mapa hipsometryczna D	116
Zał. 6 Mapa dokumentacyjna – wiercenia w korycie.....	117
Zał. 7 Model przestrzenny podłoża aluwii	118
Zał. 8 Mapy geologiczne ścienia poziomego (75 -71 m n.p.m.)	119
Zał. 9 Mapy geologiczne ścienia poziomego (70 - 66 m n.p.m.)	120
Zał. 10 Mapy geologiczne ścienia poziomego (65 -61 m n.p.m.)	121
Zał. 11 Uzbrojenie terenu wraz z obecną w korycie Wisły infrastrukturą.....	123
Zał. 12 Mapa dokumentacyjna punktów pomiarowych gradientu hydraulicznego	123
Zał. 13 Tabela wierceń	124
Zał. 14 Tabela wyników pomiarów gradientu hydraulicznego	128
Zał. 15 Karta punktu dokumentacyjnego (niecka I) CBDG.....	129
Zał. 16 Karta punktu dokumentacyjnego (między progami I i II) CBDG	130
Zał. 17 Karta punktu dokumentacyjnego (niecka II) CBDG	131
Zał. 18 Policzone wartości współczynnika filtracji dla próbek gruntu	132

Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW.

.....
(czytelny podpis autora)

lub

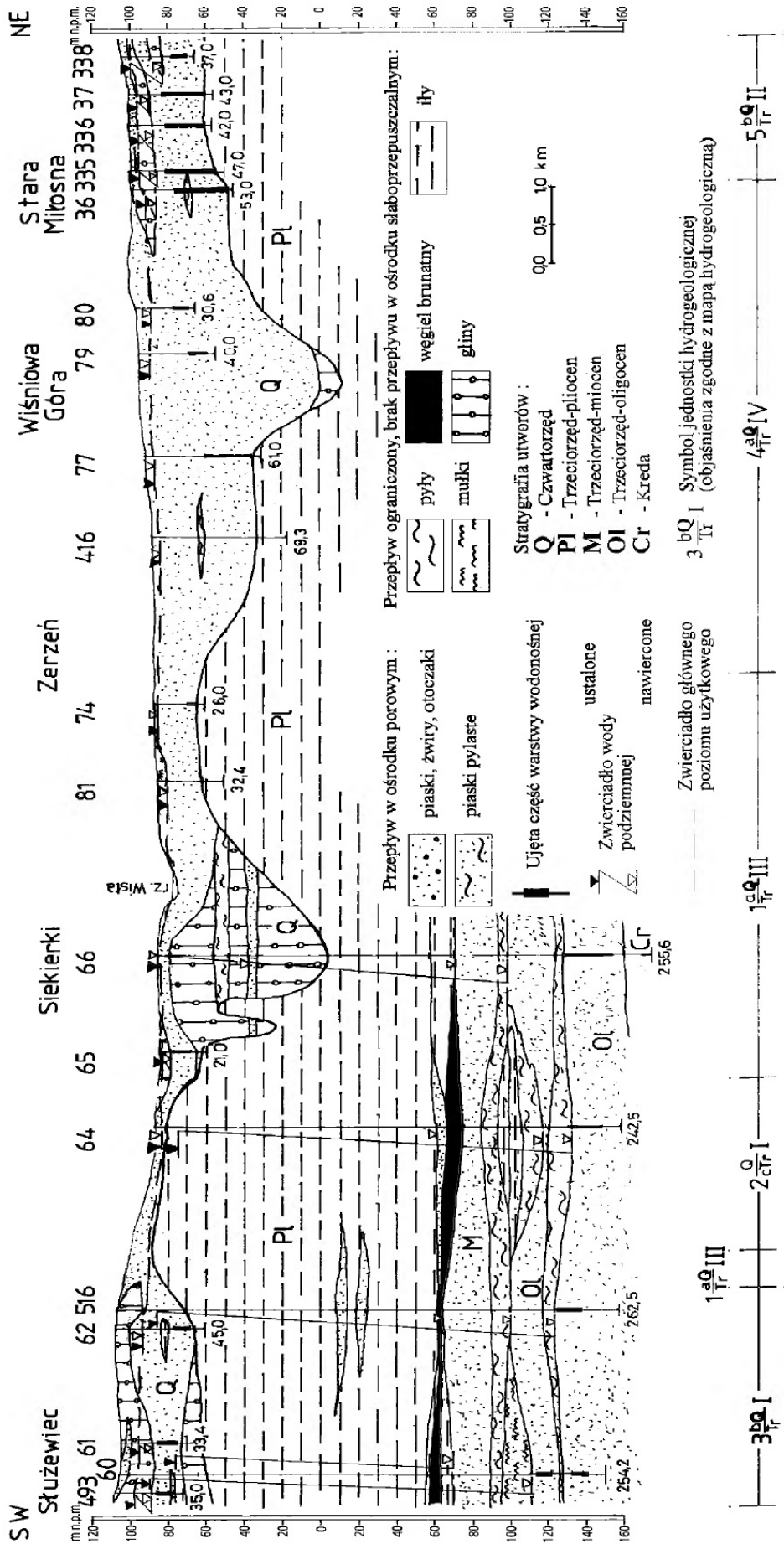
Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW
po roku * .

.....
(czytelny podpis autora)

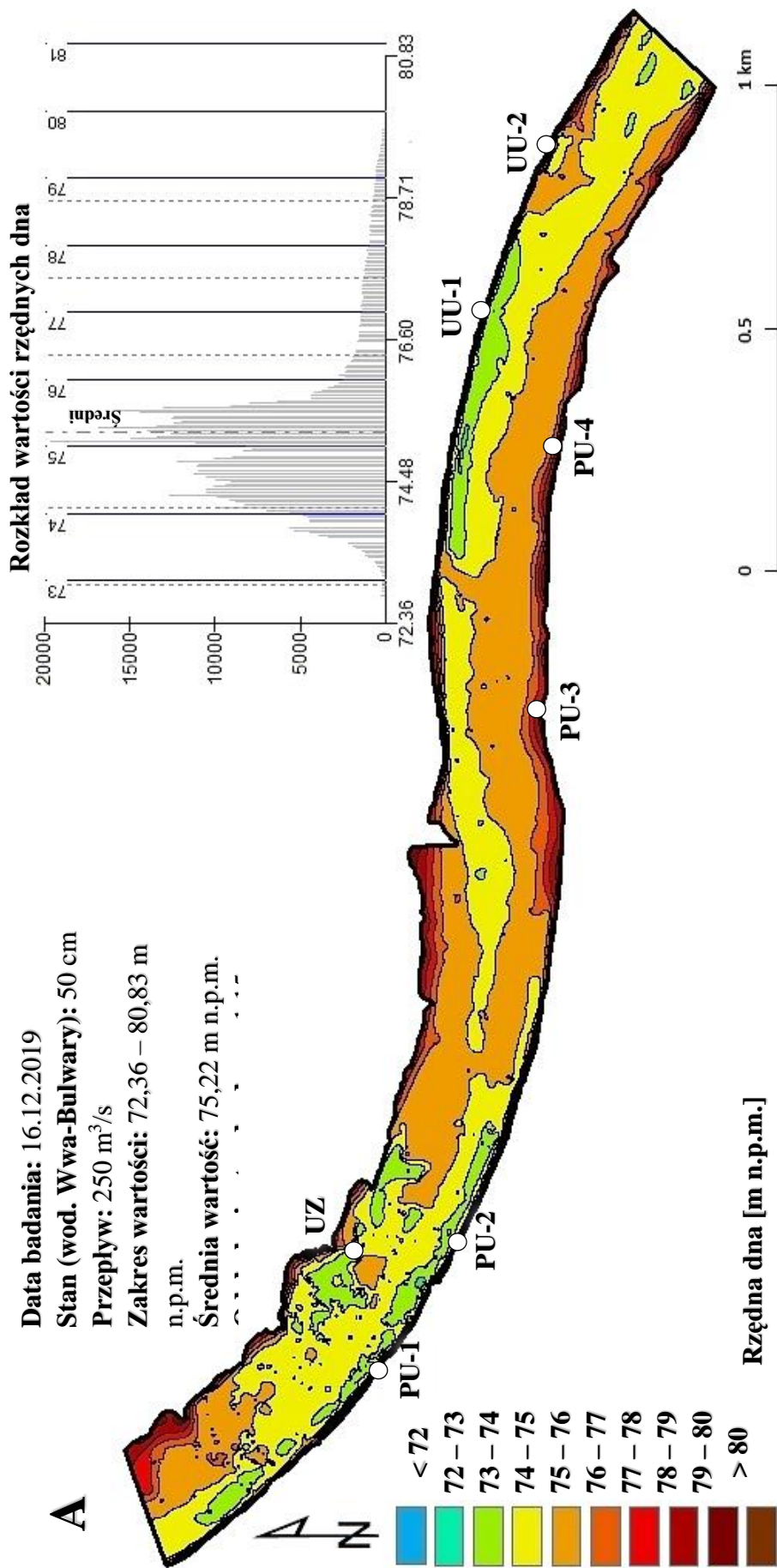
** W przypadku pracy dotowanej przez firmę z zewnątrz postulującej klauzule tajności.*

PRZEKRÓJ HYDROGEOLOGICZNY II - II

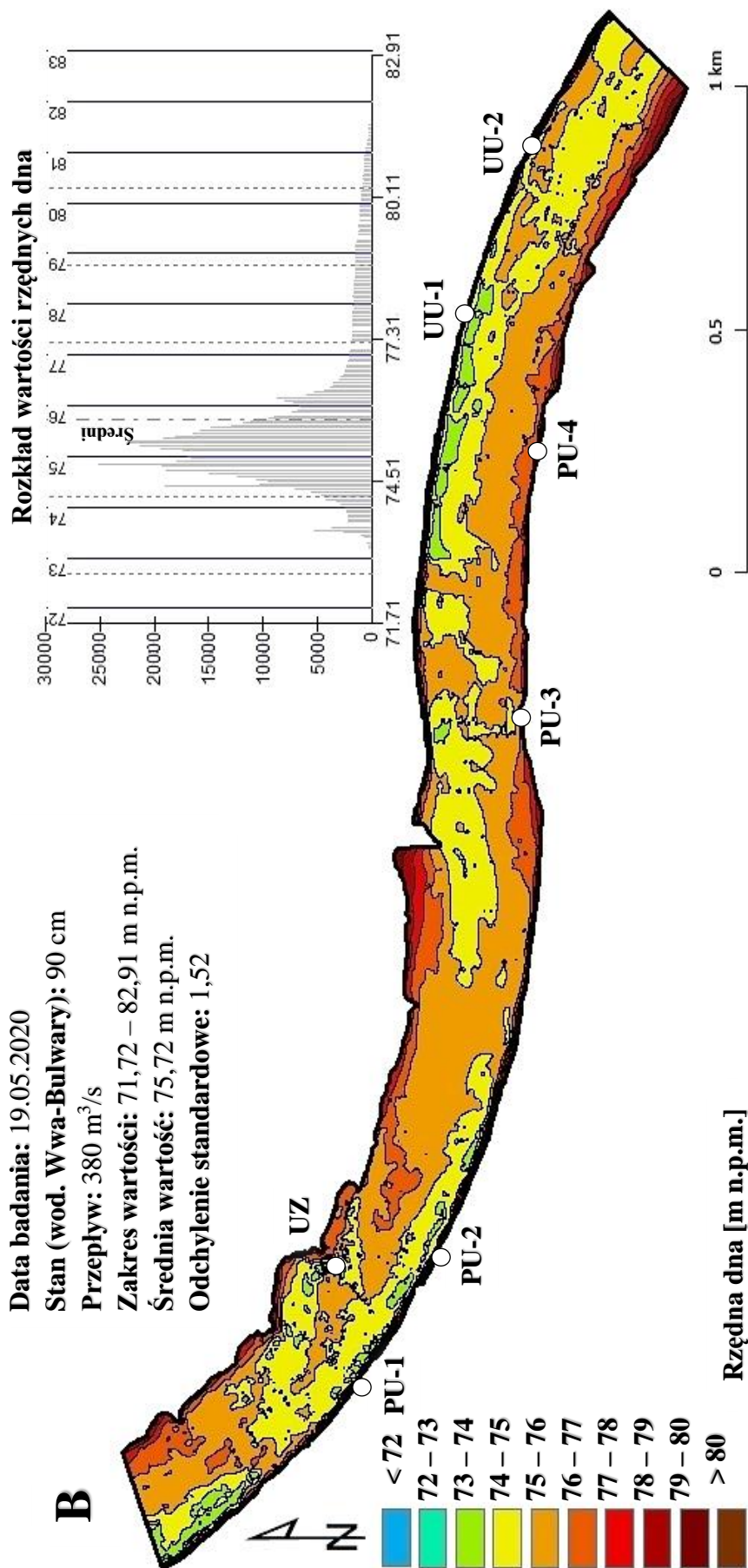
SKALA POZIOMA 1 : 50 000
SKALA PIONOWA 1 : 2000



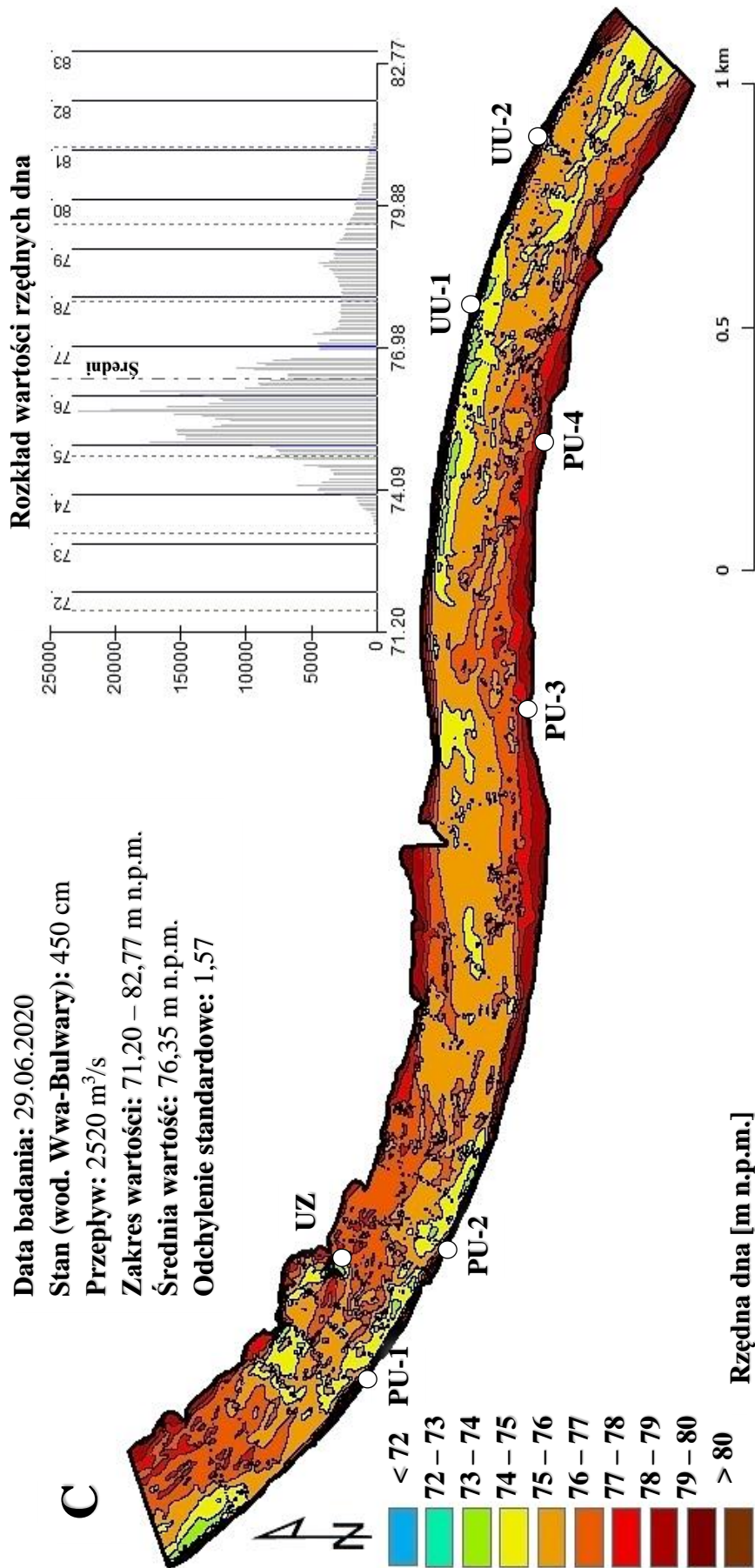
Zal. 1 Przekrój hydrogeologiczny (Cygaiński K., Woźniak E., 1997)



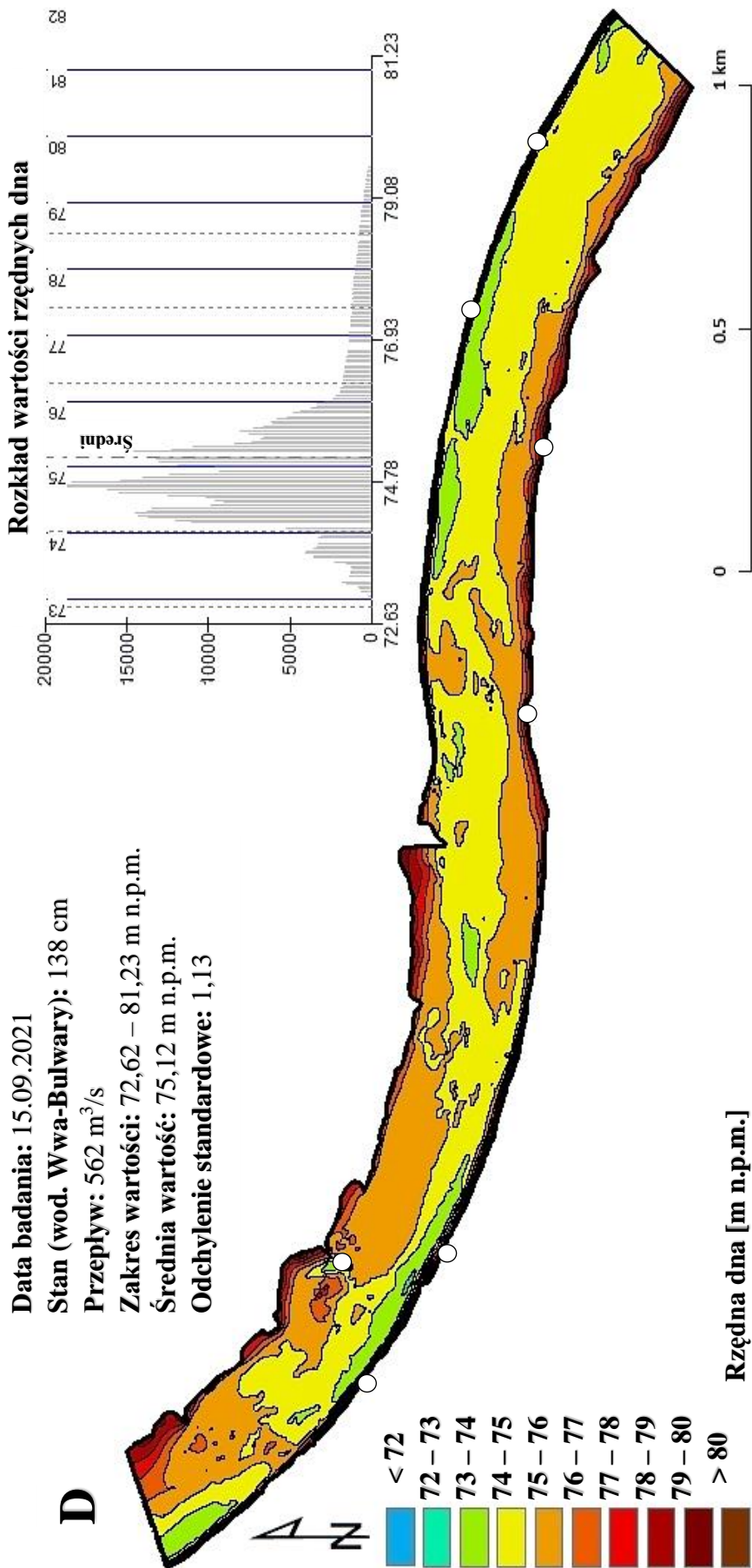
Zat. 2 Mapa hipsometryczna A



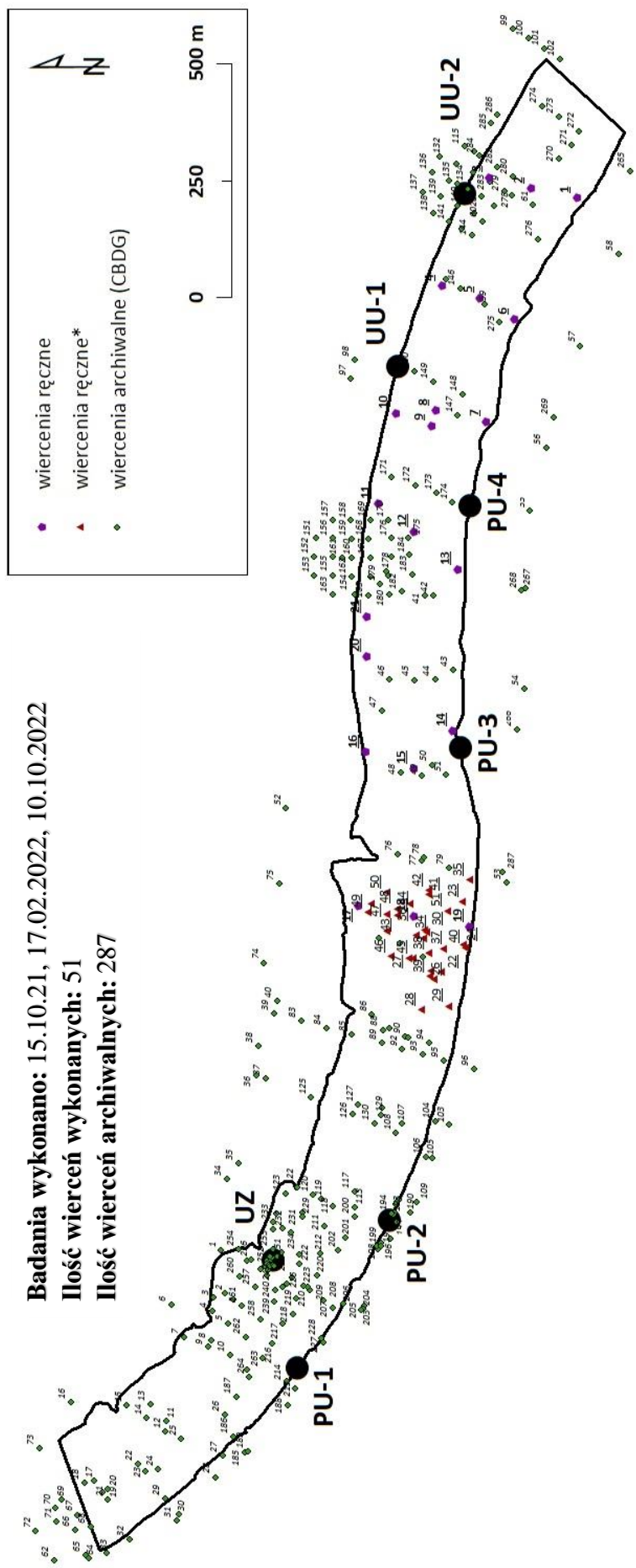
Zal. 3 Mapa hipsometryczna B



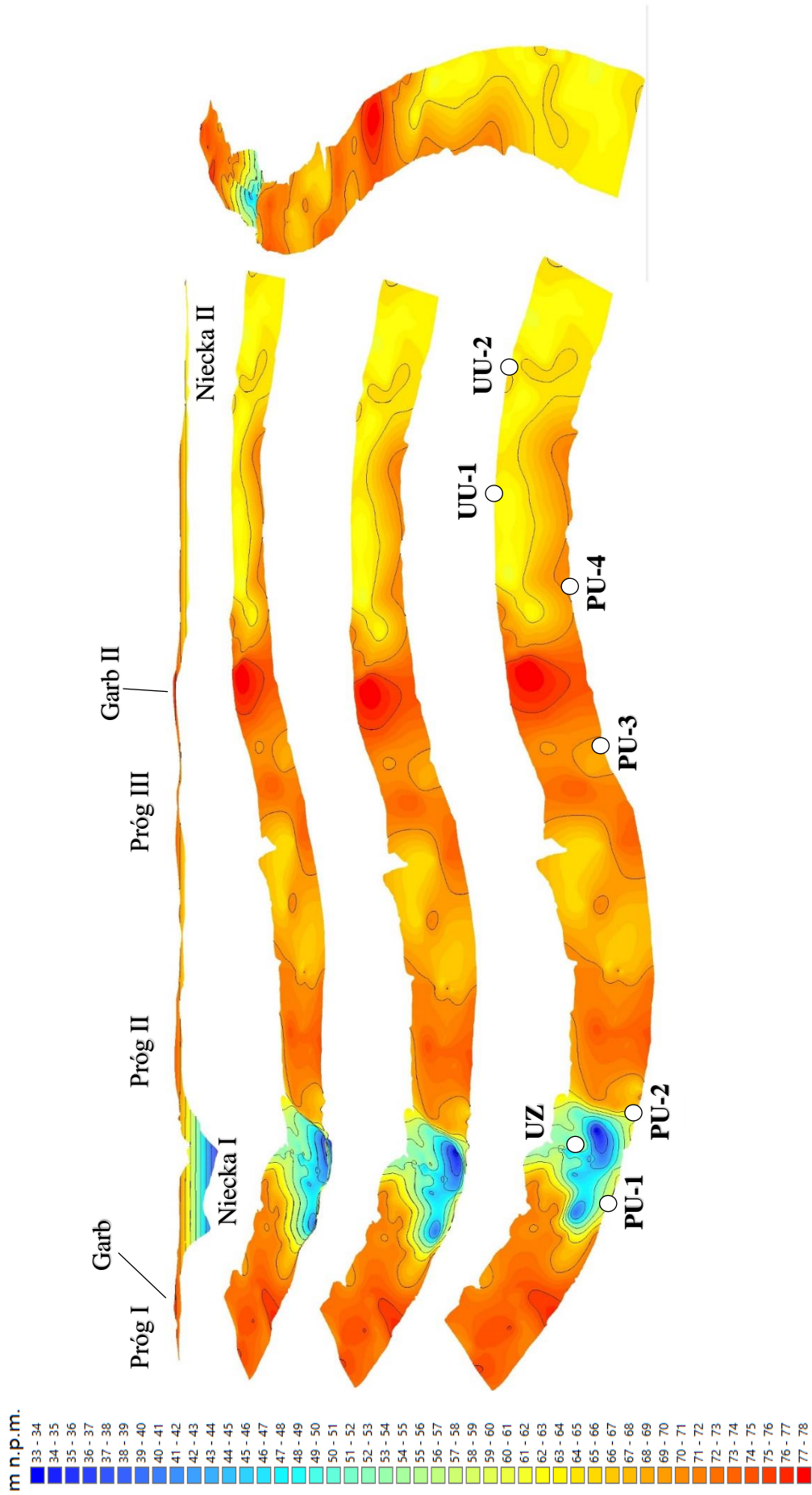
Zal. 4 Mapa hipsometryczna C



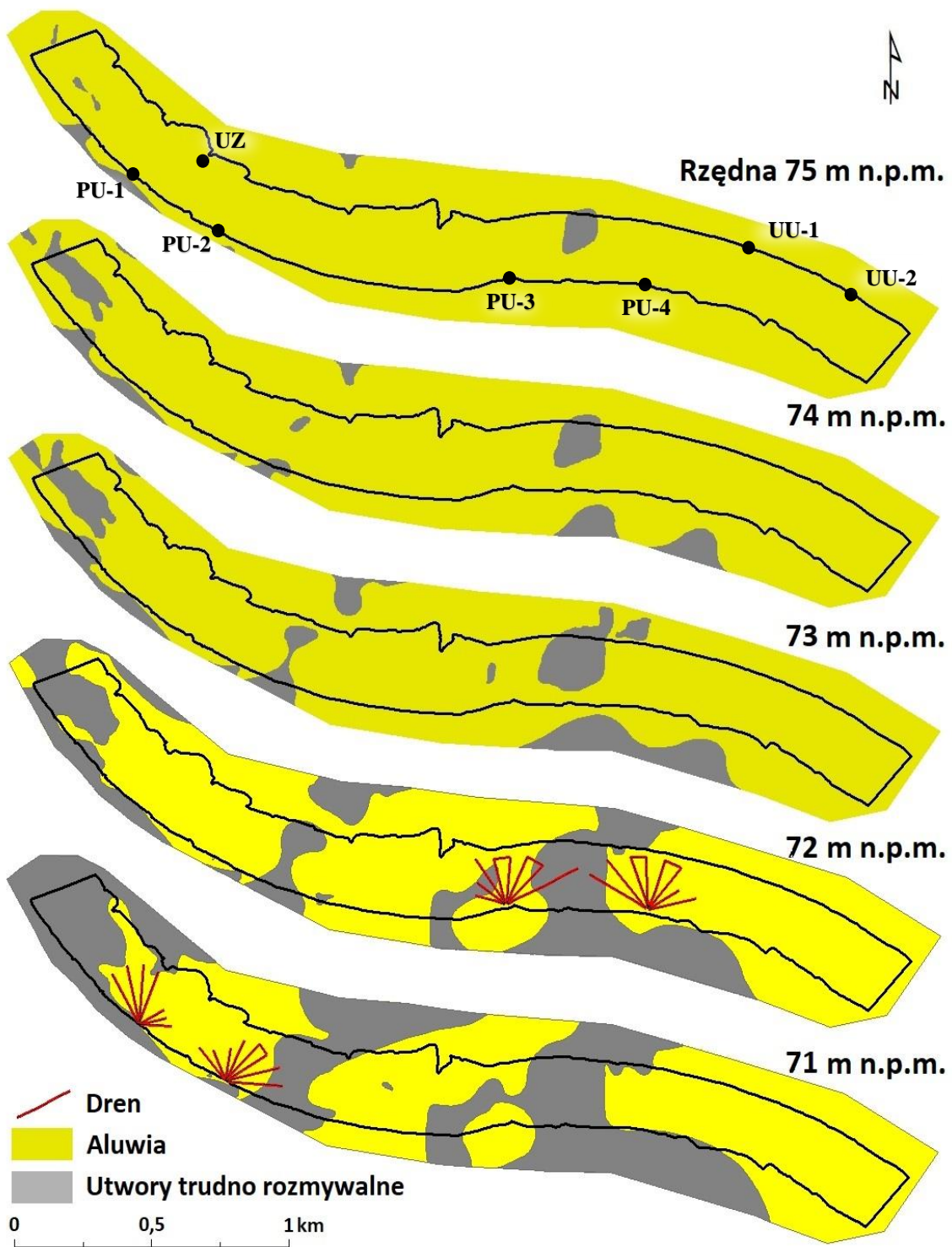
Zal. 5 Mapa hipsometryczna D



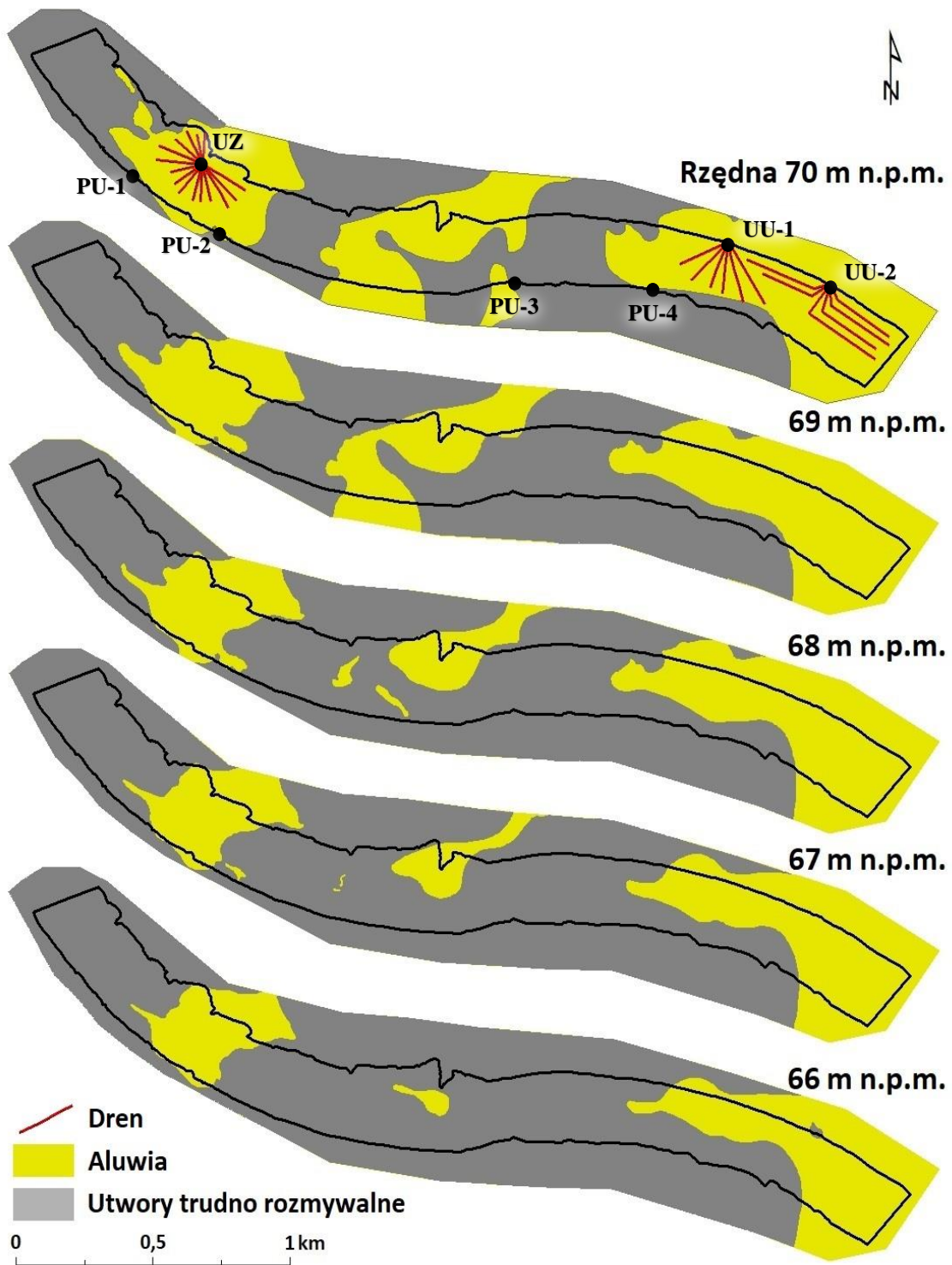
Zat. 6 Mapa dokumentacyjna – wierceńa w korycie



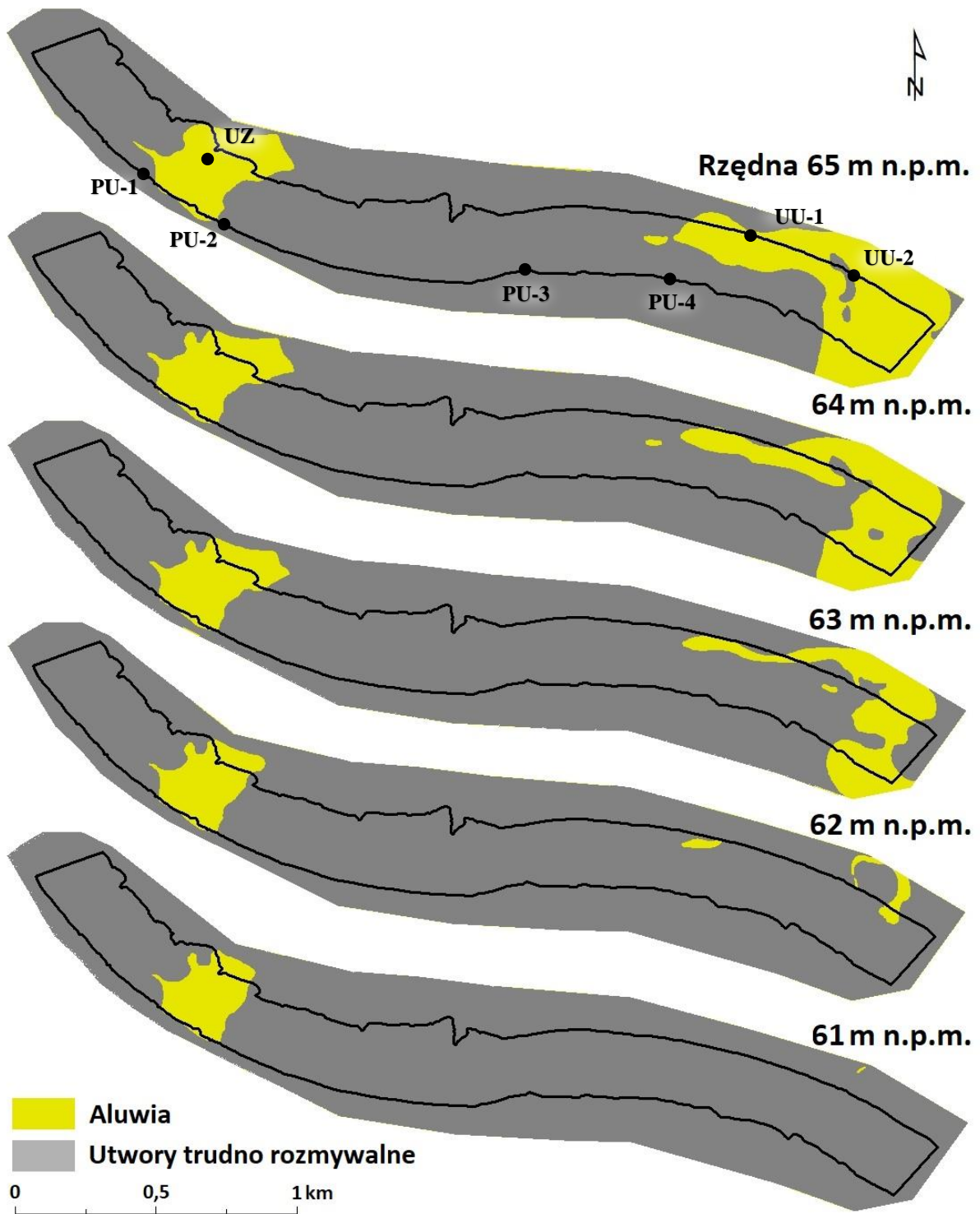
Zat. 7 Model przestrzenny podłoża aluwialnych



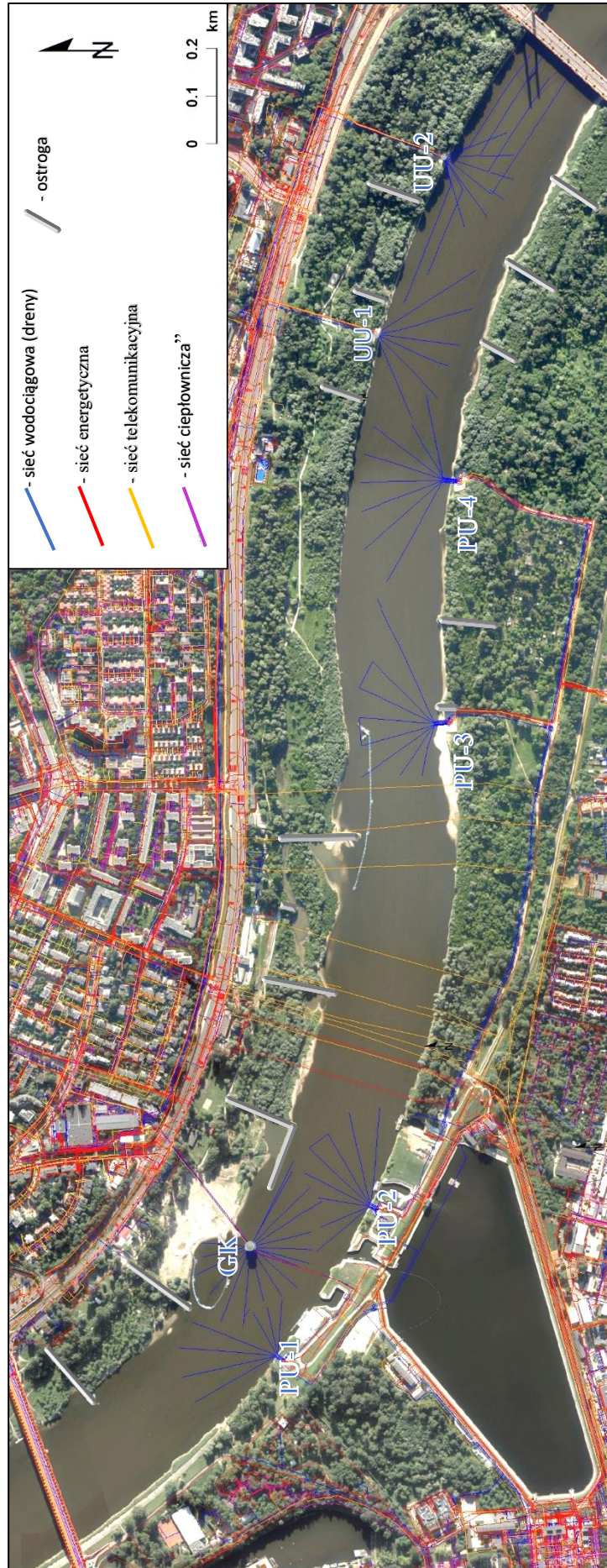
Zał. 8 Mapy geologiczne ścienia poziomego (75 -71 m n.p.m.)



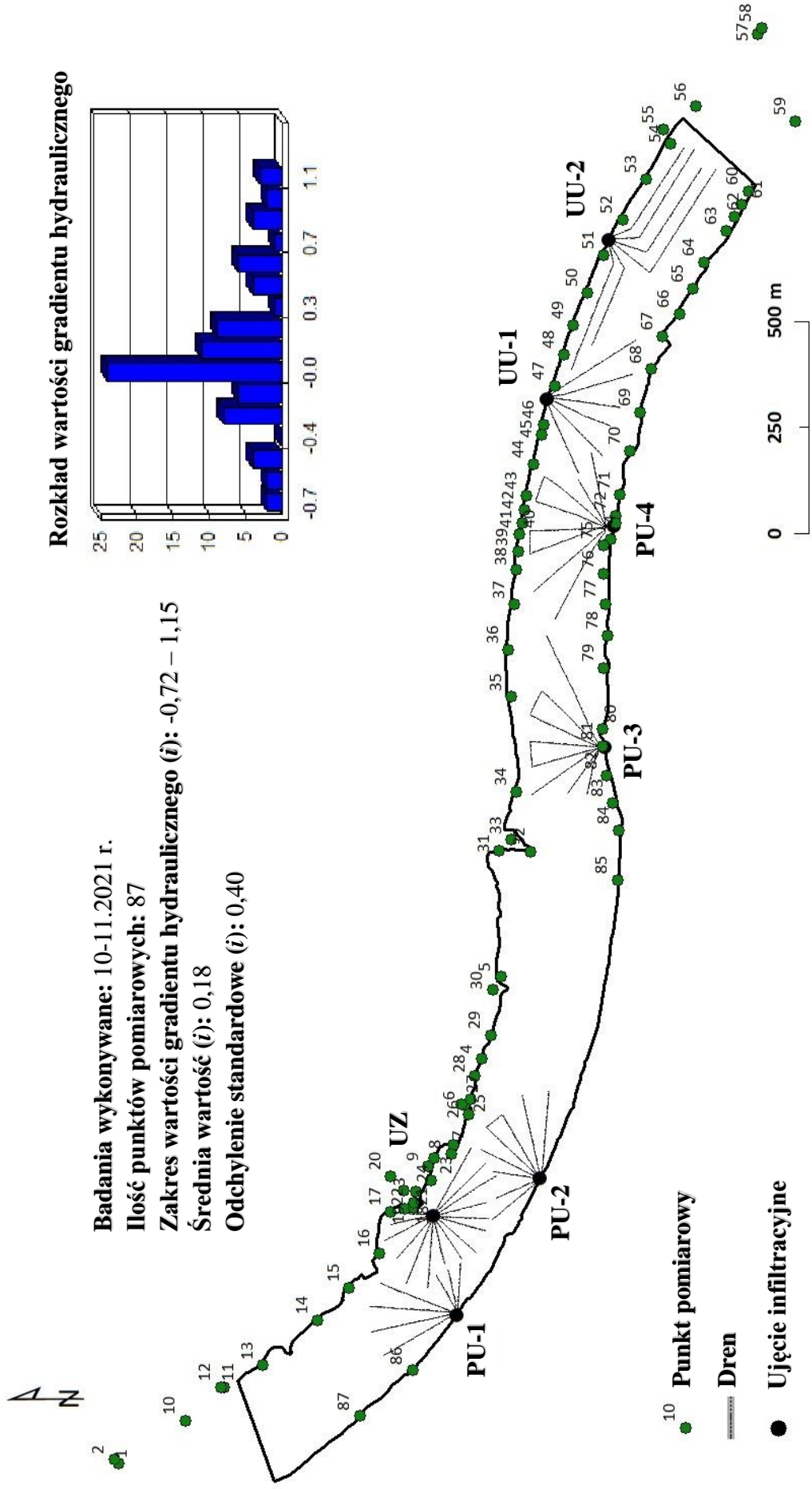
Załącznik 9 Mapy geologiczne ścieżki poziomego (70 - 66 m n.p.m.)



Zał. 10 Mapy geologiczne ściana poziomego (65 -61 m n.p.m.)



Zal. 11 Uzbrojenie terenu wraz z obecną w korycie Wisły infrastrukturą (na podstawie danych z geoportal.gov.pl)



Zal. 12 Mapa dokumentacyjna punktów pomiarowych gradientu hydraulicznego

Załącznik 13 Tabela wierceń

Nr	Nazwa otworu BDGI	x	y	Rzędna stropu	Nr	Nazwa otworu BDGI	x	y	Rzędna stropu
1	I01-PPd116-175	640477.28	486047.23	51.7	145	PPd133-86	642562.95	485565.25	63.2
2	PPd116-141	640385.20	486038.06	52.0	146	PPd133-87	642542.15	485533.19	65.3
3	I01-PPd116-140	640374.99	486062.91	70.9	147	I01-PPd133-79	642269.89	485539.03	66.3
4	PPd116-138	640347.10	486066.63	72.0	148	PPd133-85	642314.85	485528.06	67.0
5	PPd116-142	640319.99	486033.34	68.7	149	PPd133-84	642342.64	485591.29	64.0
6	I01-PPd116-171	640360.30	486153.51	71.4	150	I01-PPd133-83	642364.80	485631.72	62.0
7	PPd116-172	640290.92	486127.51	71.5	151	I01-PPd132-5	642005.65	485844.17	72.3
8	PPd116-137	640283.54	486069.10	71.5	152	PPd132-4	641965.76	485847.51	72.8
9	I01-PPd116-173	640269.88	486075.33	69.5	153	PPd132-3	641925.56	485847.24	73.0
10	PPd116-144	640252.47	486028.44	70.5	154	PPd132-7	641924.75	485807.64	73.6
11	PPd116-133	640110.09	486165.78	74.0	155	I01-PPd132-8	641965.39	485807.49	72.8
12	I01-PPd116-170	640088.11	486166.23	72.5	156	PPd132-9	642005.62	485807.13	73.4
13	PPd116-132	640146.18	486199.85	71.5	157	PPd132-10	642044.99	485806.95	73.2
14	PPd116-169	640116.61	486207.23	73.0	158	I01-PPd132-15	642043.94	485768.61	73.4
15	I01-PPd116-166	640144.79	486249.82	69.0	159	PPd132-14	642005.05	485766.69	73.2
16	I01-PPd116-19	640149.75	486369.77	75.0	160	PPd132-13	641964.62	485766.84	73.4
17	PPd116-127	639981.37	486319.51	74.5	161	PPd132-11	641964.26	485787.14	72.9
18	I01-PPd116-162	639977.59	486341.42	71.0	162	PPd132-12	641924.19	485766.77	73.6
19	PPd116-164	639956.88	486301.90	74.0	163	I01-PPd132-6	641884.33	485807.57	71.5
20	I01-PPd116-21	639963.56	486290.24	74.0	164	PPd132-16	641884.58	485760.59	75.2
21	PPd116-129	639940.48	486290.44	74.0	165	PPd132-17	641883.05	485731.77	76.3
22	I01-PPd116-168	640018.27	486225.51	74.5	166	PPd132-19	641923.81	485727.39	70.5
23	PPd116-130	640003.06	486209.00	75.0	167	I01-PPd132-20	641963.81	485727.23	72.3
24	PPd116-148	640006.55	486182.64	72.0	168	PPd132-18	642004.12	485731.53	69.3
25	PPd116-134	640071.43	486132.59	75.5	169	I01-PPd132-21	642044.45	485727.15	71.2
26	PPd116-149	640123.55	486039.01	69.7	170	PPd132-24	642045.98	485687.40	65.5
27	PPd116-174	640035.78	486044.40	75.0	171	I01-PPd132-68	642136.11	485681.01	61.3
28	I01-PPd116-139	639989.87	486059.00	78.0	172	I01-PPd132-72	642119.76	485629.55	66.3
29	PPd116-117	639943.69	486167.35	71.0	173	PPd132-76	642103.89	485583.60	69.0
30	I01-PPd116-118	639909.59	486137.62	74.0	174	I01-PPd132-60	642082.60	485550.00	69.9
31	PPd116-4	639896.74	486143.19	74.0	175	I01-PPd132-27	642007.55	485646.12	63.0
32	I01-PPd116-22	639856.25	486244.72	72.0	176	PPd132-26	642005.53	485680.56	66.9
33	I01-PPd116-163	639827.28	486293.17	72.5	177	PPd132-25	641966.33	485682.22	68.0
34	I01-PPd131-56	640628.88	486034.69	66.5	178	I01-PPd132-56	641934.50	485692.77	69.5
35	PPd131-60	640663.44	486009.62	63.5	179	PPd132-67	641908.55	485705.17	73.3
36	I01-PPd131-64	640851.80	485971.89	71.7	180	PPd132-22	641885.60	485685.70	76.7
37	PPd131-65	640846.21	485952.05	72.8	181	PPd132-23	641926.60	485687.68	69.9
38	I01-PPd131-95	640914.78	485967.50	72.9	182	PPd132-71	641890.98	485659.39	74.4
39	PPd131-41	640986.18	485934.34	76.9	183	I01-PPd132-28	641927.37	485637.12	69.3
40	PPd131-67	641012.40	485927.45	73.2	184	PPd132-52	641969.55	485642.52	67.5
41	PPd132-75	641881.98	485610.25	73.0	185	I01-S37-1	640042.29	485997.07	73.4

42	PPd132-58	641882.69	485592.28	72.9	186	S37-80	640077.32	486020.79	73.9
43	PPd132-59	641722.19	485549.09	73.3	187	I01-S37-192	640163.04	486014.03	67.5
44	I01-PPd132-74	641703.15	485586.87	72.5	188	S37-129	640143.84	485904.29	76.1
45	PPd132-70	641701.67	485632.34	73.0	189	S37-81	640044.67	485989.04	74.5
46	PPd132-66	641703.17	485685.29	73.9	190	I01-S37-30	640557.70	485640.48	77.1
47	I01-PPd132-55	641634.78	485701.59	69.8	191	S37-214	640537.13	485670.75	71.5
48	PPd132-65	641503.20	485661.11	73.4	192	S37-27	640558.33	485674.80	71.8
49	PPd132-69	641497.06	485615.23	73.1	193	S37-28	640553.35	485677.94	68.0
50	I01-PPd132-57	641519.46	485593.84	68.9	194	S37-29	640556.32	485680.59	70.9
51	PPd132-73	641497.23	485563.38	70.3	195	S37-167	640502.51	485683.30	71.3
52	I01-PPd132-61	641425.66	485907.65	72.9	196	S37-169	640480.23	485709.67	67.0
53	I01-M7-123	641267.38	485434.77	69.8	197	I01-S37-13	640486.46	485713.35	60.6
54	I01-M8-18	641682.97	485395.76	73.9	198	S37-170	640491.81	485703.92	68.0
55	I01-M8-20	642064.06	485383.58	73.4	199	S37-216	640485.97	485703.05	72.6
56	I01-M9-15	642200.54	485349.53	74.6	200	S37-164	640548.39	485760.22	69.0
57	I01-M9-22	642419.40	485275.34	72.5	201	I01-S37-163	640503.93	485780.63	51.6
58	I01-M9-25	642615.39	485194.12	63.5	202	S37-161	640477.83	485796.68	46.0
59	I01-M9-17	642507.73	485480.07	68.2	203	S37-53	640356.66	485740.64	68.7
60	I01-M9-6	642687.02	485486.01	64.5	204	S37-52	640351.92	485742.60	69.1
61	I01-M9-20	642722.37	485376.59	65.9	205	S37-51	640348.34	485745.63	69.2
62	PPd116-157	639811.59	486406.06	74.5	206	S37-212	640361.15	485784.44	55.9
63	I01-PPd116-158	639766.76	486377.04	71.0	207	I01-S37-159	640354.27	485807.64	57.7
64	PPd116-116	639815.95	486332.44	71.5	208	S37-153	640369.94	485827.33	44.0
65	I01-PPd116-20	639822.40	486338.57	70.0	209	S37-144	640390.54	485857.41	43.0
66	I01-PPd116-18	639875.99	486361.55	73.0	210	I01-S37-198	640397.87	485861.64	46.9
67	PPd116-161	639908.91	486355.19	75.5	211	S37-152	640528.52	485826.38	51.3
68	PPd116-147	639883.24	486326.70	74.5	212	I01-S37-149	640470.84	485833.28	33.3
69	I01-PPd116-16	639940.69	486389.80	71.5	213	S37-67	640179.27	485887.72	75.0
70	PPd116-126	639923.14	486402.41	75.5	214	I01-S37-208	640196.83	485906.40	71.6
71	PPd116-159	639894.88	486400.57	75.5	215	I01-S37-194	640246.22	485957.97	40.8
72	PPd116-156	639874.32	486445.77	74.5	216	S37-195	640276.72	485938.89	43.2
73	I01-PPd116-14	640051.79	486437.99	75.0	217	I01-S37-196	640319.98	485914.32	48.0
74	PPd131-96	641094.38	485955.34	73.4	218	S37-132	640340.11	485893.37	47.0
75	I01-PPd131-97	641265.05	485921.98	71.7	219	S37-197	640372.77	485885.64	46.0
76	I01-PPd131-104	641326.68	485668.87	65.3	220	S37-147	640423.19	485840.03	38.0
77	PPd131-108	641312.92	485615.78	65.6	221	S37-136	640467.43	485878.66	53.8
78	I01-PPd131-94	641319.83	485610.68	67.5	222	S37-135	640448.29	485878.46	55.0
79	PPd131-112	641298.85	485558.46	72.7	223	S37-209	640400.17	485870.13	44.0
80	I01-PPd131-111	641106.80	485614.93	67.9	224	S37-130	640418.26	485895.96	47.0
81	PPd131-107	641135.72	485663.35	71.2	225	S37-128	640405.28	485905.43	53.1
82	I01-PPd131-103	641147.80	485708.35	65.5	226	S37-204	640398.20	485915.37	52.0
83	PPd131-42	640969.82	485875.69	73.5	227	S37-215	640278.30	485828.27	61.0
84	PPd131-43	640954.80	485821.94	71.4	228	I01-S37-12	640287.45	485832.82	60.0
85	I01-PPd131-44	640940.42	485767.99	71.4	229	I01-S37-211	640548.89	485872.95	50.4

86	I01-PPd131-102	640983.35	485723.68	69.9	230	S37-131	640514.08	485896.61	55.5
87	I01-PPd131-106	640953.08	485685.59	66.1	231	S37-126	640524.86	485914.80	55.9
88	PPd131-74	640950.36	485699.90	70.8	232	I01-S37-206	640522.61	485935.12	53.9
89	PPd131-45	640921.31	485701.64	70.2	233	S37-123	640536.59	485934.85	55.6
90	PPd131-76	640936.26	485651.26	70.1	234	S37-125	640473.37	485918.51	50.7
91	I01-PPd131-110	640932.81	485645.66	66.0	235	S37-106	640443.90	485954.29	58.3
92	PPd131-46	640908.55	485658.11	70.0	236	S37-203	640422.06	485950.08	55.0
93	PPd131-47	640896.86	485614.18	69.1	237	S37-111	640433.72	485947.80	55.6
94	I01-PPd131-77	640922.19	485601.34	68.1	238	S37-101	640437.14	485962.62	57.2
95	PPd131-48	640883.48	485570.00	72.7	239	S37-121	640367.78	485932.73	44.8
96	PPd131-49	640865.01	485503.66	70.6	240	S37-122	640391.35	485932.01	51.0
97	I01-PPd133-25	642349.22	485768.28	67.7	241	S37-205	640462.64	485926.14	53.0
98	PPd133-26	642388.28	485759.84	70.5	242	S37-115	640447.71	485940.52	49.8
99	I01-PPd145-8	643099.20	485420.67	65.1	243	S37-113	640450.85	485942.96	48.0
100	PPd145-10	643078.68	485387.82	64.1	244	S37-110	640455.45	485948.46	54.0
101	I01-PPd145-13	643056.62	485353.34	64.4	245	S37-109	640448.18	485949.60	54.4
102	PPd145-18	643035.33	485319.95	65.6	246	S37-112	640444.73	485944.74	56.5
103	PPd131-21	640746.06	485557.08	73.4	247	S37-168	640443.71	485941.26	49.4
104	I01-PPd131-20	640754.30	485588.00	74.0	248	S37-120	640445.01	485935.66	50.1
105	I01-PPd131-78	640674.33	485594.67	74.3	249	I01-S37-171	640443.14	485932.60	45.6
106	PPd131-113	640677.99	485607.47	74.4	250	S37-116	640456.52	485939.27	55.6
107	PPd131-109	640749.35	485659.82	73.8	251	S37-119	640461.89	485936.95	55.2
108	I01-PPd131-75	640728.27	485671.94	72.0	252	S37-114	640463.40	485941.97	55.2
109	PPd131-4	640580.72	485627.42	75.2	253	S37-118	640479.18	485936.47	53.0
110	I01-PPd131-3	640584.00	485665.39	69.3	254	I01-S37-201	640479.12	486009.01	54.6
111	PPd131-2	640580.98	485669.41	66.0	255	S37-202	640454.13	485992.55	52.3
112	PPd131-1	640576.74	485671.87	67.0	256	S37-96	640456.22	485983.21	55.2
113	PPd131-100	640570.10	485759.83	69.1	257	S37-98	640397.33	485973.99	58.5
114	PPd133-50	642836.37	485502.55	62.4	258	S37-99	640328.37	485963.45	64.8
115	I01-PPd133-45	642846.94	485524.09	63.0	259	I01-S37-87	640371.89	486021.17	55.5
116	PPd133-49	642792.47	485505.98	64.4	260	S37-89	640421.56	486007.68	64.9
117	I01-PPd131-92	640602.30	485760.72	69.3	261	S37-90	640358.52	486002.97	67.1
118	PPd131-80	640572.14	485806.56	68.1	262	S37-93	640290.67	485994.46	69.4
119	PPd131-99	640586.80	485833.00	67.5	263	S37-92	640220.07	485992.51	68.4
120	PPd131-70	640595.86	485849.60	65.1	264	S37-193	640204.71	485986.44	64.9
121	PPd131-69	640557.09	485873.05	52.0	265	I01-M9-105d	642794.50	485168.49	62.5
122	I01-PPd131-98	640611.81	485883.72	62.9	266	M8-12	641595.19	485412.41	70.0
123	PPd131-68	640599.46	485909.20	62.1	267	M8-19	641899.71	485392.37	74.8
124	PPd131-66	640554.96	485929.86	57.0	268	I01-M8-13	641893.24	485401.88	74.8
125	I01-PPd131-71	640805.39	485853.73	66.9	269	M9-19	642264.78	485332.44	74.3
126	PPd131-72	640769.22	485765.16	73.8	270	M9-23	642821.36	485321.17	64.0
127	PPd131-101	640789.94	485752.50	74.4	271	M9-13	642850.39	485293.76	62.5
128	PPd131-93	640783.14	485702.05	71.2	272	M9-24	642880.13	485277.86	63.4
129	PPd131-105	640768.03	485702.95	73.7	273	M9-32	642910.46	485322.13	62.3

130	I01-PPd131-73	640748.57	485718.02	72.6	274	M9-21	642933.34	485358.42	63.8
131	PPd133-43	642810.10	485541.95	62.3	275	M9-14	642469.48	485448.61	70.7
132	I01-PPd133-38	642826.01	485577.43	62.8	276	M9-16	642648.01	485367.27	64.0
133	I01-PPd133-46	642755.80	485517.13	60.9	277	M9-18	642742.05	485421.96	62.6
134	PPd133-42	642766.74	485540.69	63.4	278	M9-9	642718.72	485461.26	65.6
135	I01-PPd133-40	642774.36	485557.49	62.5	279	M9-11	642751.73	485438.79	62.9
136	PPd133-36	642791.46	485593.71	62.5	280	M9-12	642781.91	485420.44	62.0
137	I01-PPd133-34	642748.35	485614.42	60.3	281	M9-7	642740.57	485487.41	65.7
138	PPd133-35	642702.94	485592.48	62.1	282	M9-10	642803.60	485453.57	62.8
139	PPd133-37	642739.08	485575.07	61.4	283	M9-8	642770.39	485470.62	64.0
140	PPd133-41	642720.61	485539.11	65.0	284	M9-5	642826.87	485492.83	63.1
141	I01-PPd133-39	642684.90	485556.54	66.0	285	I01-M9-1	642898.18	485466.74	61.5
142	I01-PPd133-48	642704.33	485503.70	63.9	286	M9-2	642914.65	485453.51	62.0
143	PPd133-44	642670.24	485530.69	63.5	287	M7-120	641288.58	485441.93	72.9
144	PPd133-47	642656.27	485508.16	62.3					

Załącznik 14 Tabela wyników pomiarów gradientu hydraulicznego

Nr	x	y	Δh	Głębokość wbicia Gradientomierza [cm]	i [-]	Nr	x	y	Δh	Głębokość wbicia Gradientomierza [cm]	i [-]
1	486676.2	486676.2	25	30	0.83	45	485680.6	485680.6372	3	25	0.12
2	486685.1	486685.1	21	35	0.60	46	485676.0	485676.007	-8	80	-0.10
3	485978.0	485978	-59	23	-0.71	47	485651.5	485651.533	12	20	0.60
4	485822.0	485822	5	56	0.09	48	485628.4	485628.3819	29	30	0.97
5	485777.7	485777.7	4	55	0.07	49	485607.2	485607.2152	2	40	0.05
6	485862.1	485862.1	10	56	0.18	50	485573.5	485573.4807	-12	60	-0.20
7	485888.3	485888.3	2	57	0.04	51	485535.8	485535.7775	-13	70	-0.19
8	485894.7	485894.7	2	43	0.05	52	485492.1	485492.1212	-12	50	-0.24
9	485947.7	485947.7	-14	58	-0.24	53	485436.6	485436.5586	5	45	0.11
10	486518.6	486518.6	28	25	1.12	54	485379.0	485379.0116	-7	35	-0.20
11	486428.1	486428.1	22	45	0.49	55	485396.2	485396.2096	-18	25	-0.72
12	486435.5	486435.5	29	35	0.83	56	485318.8	485318.8188	2	25	0.08
13	486337.1	486337.1	6	30	0.20	57	485174.6	485174.6206	15	30	0.50
14	486207.5	486207.5	26	30	0.87	58	485165.4	485165.3601	9	35	0.26
15	486134.6	486134.6	2	50	0.04	59	485085.7	485085.705	3	40	0.08
16	486062.8	486062.8	32	45	0.71	60	485205.8	485205.8337	1	30	0.03
17	486037.0	486037	2	30	0.07	61	485220.1	485220.07	2	30	0.07
18	486003.8	486003.8	-3	70	-0.04	62	485243.0	485242.988	6	30	0.20
19	485981.2	485981.2	-18	45	-0.40	63	485262.3	485262.3051	20	30	0.67
20	486036.3	486036.3	5	25	0.20	64	485300.3	485300.3438	10	30	0.33
21	486005.8	486005.8	-13	25	-0.52	65	485325.7	485325.7442	8	30	0.27
22	485982.7	485982.7	-15	40	-0.37	66	485358.8	485358.8439	10	30	0.33
23	485941.1	485941.1	-23	50	-0.46	67	485397.6	485397.6161	18	30	0.60
24	485934.4	485934.4	1	45	0.02	68	485423.5	485423.5415	6	30	0.20
25	485869.6	485869.6	8	30	0.27	69	485451.0	485451.0197	18	30	0.60
26	485852.2	485852.2	4	30	0.13	70	485474.7	485474.6672	33	30	1.10
27	485847.8	485847.8	2	25	0.08	71	485498.2	485498.1621	9	30	0.30
28	485838.0	485838	-4	25	-0.16	72	485508.1	485508.1096	8	30	0.27
29	485801.4	485801.4	5	20	0.25	73	485508.7	485508.7292	3	30	0.10
30	485797.0	485797	3	30	0.10	74	485520.1	485520.1282	0	30	0.00
31	485782.2	485782.2	-1	30	-0.03	75	485536.9	485536.9194	0	30	0.00
32	485708.8	485708.8	-1	30	-0.03	76	485535.9	485535.8828	3	30	0.10
33	485752.4	485752.4	2	20	0.10	77	485530.9	485530.8834	18	30	0.60
34	485741.2	485741.2	26	25	1.04	78	485526.5	485526.5205	2	30	0.07
35	485752.2	485752.2	5	40	0.13	79	485536.5	485536.4514	3	30	0.10
36	485759.4	485759.4	-12	55	-0.22	80	485538.3	485538.2697	17	30	0.57
37	485745.9	485745.9	5	25	0.20	81	485537.8	485537.7998	10	30	0.33
38	485741.5	485741.5	31	20	1.15	82	485540.4	485540.4321	3	30	0.10
39	485737.5	485737.5	7	20	0.35	83	485527.4	485527.3725	6	30	0.20
40	485733.6	485733.6	-9	75	-0.12	84	485517.9	485517.8735	5	30	0.47
41	485727.6	485727.6	-13	25	-0.52	85	485504.1	485504.1064	25	30	0.83
42	485723.0	485723	-1	45	-0.02	86	485985.3	485985.2964	0	30	-0.20
43	485716.4	485716.4	2	60	0.03	87	486108.6	486108.5534	2	30	0.07
44	485701.1	485701.1	-23	55	-0.42						

Załącznik 15 Karta punktu dokumentacyjnego (niecka I) CBDG

Głębokość zwierciadła wody [m.p.p.]		Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przebieg [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	Wilgotność	Stan gruntu	Seria BDGI
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.00						woda	woda			WODA
				0.60		piasek średni + żwir	Ps+Z	nw		QhRNsp
				5.50		piasek gruby + żwir	Pr+Z	nw		QpRNsp
				9.55		piasek drobny z domieszką pyłu	Pd+It	nw		QpRNsp
				11.05		piasek gruby	Pr	nw		QpRNsp
				44.40		piaski + żwir	Ps+Z	nw	pl	QpRNsp
				44.75		il	Il	W		PlJSp
				44.85						

Rysunek wykonano programem "GeoStar"

Data: 03.2018 r.

Załącznik 16 Karta punktu dokumentacyjnego (między progami I i II) CBDG

Głębokość zwiarcia wody [m p.p.t]		Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przebieg [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	Wilgotność	Stan gruntu	Seta BDGI
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.00						woda	woda			WODA
				1.35		piasek średni	Ps	nw		QhRNsp
				5.65		piasek średni	Ps	nw		QhRNsp
				7.00		lignit	WB	nw		QhRNsp
				7.20		piasek grubo	Pr	nw		QpRNsp
				7.55		żwir	Z	nw		QpRNsp
				8.45		piasek średni	Ps	nw		QpRNsp
				9.30		piasek grubo	Pr	nw		QpRNsp
				10.95		żwir	Z	nw		QpRNsp
				11.40		piasek średni	Ps	nw		QpRNsp
				13.80		il	I	nw		PIJSp
				14.15		il	I			PIJSp
				16.70						

Rysunek wykonano programem "GeoStar"

Data: 03.2018 r.

Zał. 17 Karta punktu dokumentacyjnego (niecka II) CBDG

Głębokość zwierciadła wody [m p.p.ł]		Stratygrafia	Skala [m]	Profil	Przebieg [m]	Opis Litologiczny	Symbol gruntu	Wilgotność	Stan gruntu	Seria BDGI
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.00						woda	woda			WODA
					4.00	pospółka	Po	nw	In	QhRNsp
					7.80	piasek średni	Ps	nw	In	QhRNsp
					8.20	pospółka	Po	nw	In	QhRNsp
					8.80	il	I	nw	tpl	PIJSp
					9.80	il pylasty	Iz	w	tpl	PIJSp
					14.20					

Rysunek wykonano programem "GeoStar"

Data:03.2018 r.

*Zał. 18 Policzone wartości współczynnika filtracji dla próbek gruntu
(1-17 próbki archiwalne 18-24 próbki pobrane podczas badań terenowych)*

Nr	Rodzaj gruntu	Współczynnik filtracji [m/s]	Nr	Rodzaj gruntu	Współczynnik filtracji [m/s]
1	Pospółka	$4,1 \times 10^{-4}$	13	Pśr	$1,4 \times 10^{-4}$
2	Pśr	$1,6 \times 10^{-4}$	14	Pśr	$2,6 \times 10^{-4}$
3	Pd	$8,9 \times 10^{-5}$	15	Pśr	$2,8 \times 10^{-4}$
4	Pśr	$2,3 \times 10^{-4}$	16	Pospółka	$3,2 \times 10^{-4}$
5	Pśr	3×10^{-4}	17	Pśr	$2,8 \times 10^{-4}$
6	Pd	$9,9 \times 10^{-5}$	18	Nm piaszczysty	$4,5 \times 10^{-5}$
7	Pd	$9,9 \times 10^{-5}$	19	Nm	$2,3 \times 10^{-5}$
8	Pśr	$3,2 \times 10^{-4}$	20	Nm piaszczysty	$4,6 \times 10^{-5}$
9	Pśr	$1,4 \times 10^{-4}$	21	Pd	$2,7 \times 10^{-5}$
10	Pśr	$3,2 \times 10^{-4}$	22	Nm pylasty	$5,6 \times 10^{-6}$
11	Pśr	$2,3 \times 10^{-4}$	23	Pśr	$2,6 \times 10^{-4}$
12	Pśr	$1,4 \times 10^{-4}$	24	Pśr	$4,4 \times 10^{-4}$