

Autorzy: inż. Karolina Laskowska, inż. Mateusz Lesiak

Opiekun naukowy : mgr inż. Marcin Lisowski

## **ROLA POMIARÓW BATYMETRYCZNYCH W BEZPIECZEŃSTWIE PRZECIWPOWODZIOWYM**

**Streszczenie.** Niewystarczająca liczba opracowań batymetrycznych dotyczących dróg wodnych w Polsce, powoduje potrzebę opracowania prostych systemów pomiarowych pozwalających na szybkie i ekonomiczne pozyskiwanie informacji o ukształtowaniu dna wód śródlądowych. Brak opracowanych standardów i wytycznych dodatkowo komplikuje schemat pomiarowy, a bazowanie na wytycznych Międzynarodowej Organizacji Hydrograficznej (ang. IHO) [2] nie rozwiązuje problemu. Podczas badań na rzece Wiśle wykorzystano powszechnie stosowane powiązanie echosondy z odbiornikiem GPS, co pozwoliło na proste pozyskiwanie danych pomiarowych dna rzeki. Analiza otrzymanych wyników pomiarów koryta wraz z łóżyskiem rzeki i pomiar wałów przeciwpowodziowych pozwolił na utworzenie kompletnego numerycznego modelu terenu. Połączenie danych pomiarowych z poziomem lustra wody i symulacja poziomów alarmowych, pozwoliła na wskazanie zagrożonych rejonów wałów, a także obszarów rzeki wymagających prac hydrotechnicznych.

**Słowa kluczowe:** batymetria, NMT, przekroje, niwelacja.

### **1. Wstęp**

Wisła jest naturalnym ciekim wodnym, która kształtowała swoje koryto i dolinę przez wiele lat. Jest ona zarazem źródłem kruszywa jak i szlakiem komunikacyjnym jednostek technicznych i turystycznych. Występujące suche i deszczowe pory roku, zmieniają oblicze rzeki. W przeciągu kilku dni z powodu wezbrań Wisła może stać się jednym z największych zagrożeń ludzkości. Analizując geodezyjne pomiary sytuacyjno – wysokościowe terenów zalewowych wraz z pomiarami batymetrycznymi rzeki można zaplanować konkretne działania, mające na celu zminimalizowanie skutków ewentualnych powodzi. Nieodzownym elementem jest także badanie stanu technicznego/geologicznego wałów przeciwpowodziowych. Określenie najmniejszych wartości rzędnych na wałach ma istotny wpływ na określenie maksymalnej wysokości zwierciadła wody nieprzekraczającej wałów przeciwpowodziowych. Natomiast pomiar batymetryczny może posłużyć do określenia miejsc na rzece, które należałoby pogłębić w celu przyjęcia przez Wisłę większej ilości wody.

## **2. Cel badań**

Badania batymetryczne odcinka miejskiego rzeki Wisły w Warszawie (od mostu Łazienkowskiego do mostu Świętokrzyskiego) miały na celu przedstawienie ukształtowania dna koryta i brzegu rzeki pod kątem określenia krytycznego poziomu wody zagrażającemu przelaniem przez wały. Na tym odcinku rzeka jest uregulowana, nie tworzy typowych mielizn występujących na odcinkach dzikich, ale występują obszary z podwodnymi kamienistymi rafami i pozostałościami po przepławach rzecznych zniszczonych podczas wojen światowych. Problematyka prowadzenia pomiarów na obszarach śródlądowych bardzo różni się od problemów towarzyszących pomiarom morskim czy portowym. Zarazem w trakcie akwizycji, jak i przy późniejszej obróbce danych batymetrycznych warunki środowiskowe i rozwiązania technologiczne znaczenie od siebie odbiegają. Generalnie słaba przezroczystość wód eliminuje w tym wypadku pomiary opierające się na falach świetlnych, ze względu na dużo gorsze rozchodzenie się ich od fali akustycznej. W takim środowisku akustyczne metody prowadzenia sondaży są tu nieuniknione [4, s.2]. Wyniki badań pokazały możliwości wykorzystania pomiarów sonarowych zintegrowanych z pomiarami GPS oraz tradycyjnych technik geodezyjnych GPS/RTK i tachimetrii do opracowania numerycznych modeli terenu koryta rzeki wraz z linią brzegową. Podczas trwania badań, oprócz modelu dna rzeki, opracowano model terenów zalewowych i szereg przekrojów pokazujących aspekty przeciwpowodziowe na tym terenie. Aktualny stan lustra wody powiązано z układem współrzędnych wysokościowych „ PL-KRON86-NH”. Zrealizowano to poprzez pomiar niwelacyjny nawiązany do reperów wysokościowych znajdujących się w pobliżu badanego obszaru.

## **3. Badania**

### **3.1. Pomiary**

Badanym obszarem był odcinek miejski rzeki Wisły od kilometrażu 510,5 do 512,7. Podczas wstępnych sondowań określono maksymalne i minimalne głębokości koryta oraz występowanie podwodnych przeszkód i miejsc niedostępnych do pomiarów z jednostki pływającej. Przed rozpoczęciem prac na wodzie, zaprojektowano przekroje pomiarowe, wzdłuż których prowadzone były pomiary. Przygotowanie projektu profili ma na celu pokrycie sondowanego akwenu na całej jego powierzchni systemem linii w taki sposób, aby

zebrane w czasie prac dane pomiarowe zapewniły zobrazowanie zmian ukształtowania dna zbiornika, wykrycie przeszkód podwodnych i miejsc niebezpiecznych [4, s.6]. W praktyce odległości pomiędzy poszczególnymi profilami pomiarowymi są często modyfikowane bezpośrednio podczas pomiaru ze względu na zmienny prąd wody i przeszkody podwodne. Podczas pomiarów odległości między profilami mieściły się w przedziale 20-25m.

Do pozyskania informacji o ukształtowaniu dna koryta Wisły, zastosowano system pomiarowy złożony z echosondy Lovrance połączonej z odbiornikiem GPS działającym w trybie pozycjonowania DGPS, umieszczonym na jednostce pływającej. Niewielkie zanurzenie jednostki ok. 30 cm pozwalało na pomiar na bardzo płytkich obszarach. Zestaw pomiarowy umieszczony na motorówce składał się z echosondy Lovrance wyposażonej w przetwornik cyfrowy generujący impulsy o częstotliwość 200 kHz. Prędkość emitowanej fali dźwiękowej wynosiła 1490 m/s, szerokość wiązki wynosiła ok. 6°. Minimalna głębokość, przy której można było uzyskać dokładny pomiar, wynosiła 40cm. Zapis danych następował co 1 s i był automatycznie zapisywany na karcie pamięci SD. Dane pomiarowe pokazujące współrzędne geograficzne pozyskiwane były z odbiornika GPS zintegrowanego z urządzeniem echolokacyjnym. Do współrzędnych zostały wprowadzone korekcje DGPS z satelitów geostacjonarnych ESA w systemie EGNOS, co pozwoliło na uzyskanie dokładności wyznaczenia pozycji poniżej 1 m. Podczas prac pomiarowych niektóre obszary rzeki, gdzie głębokość wynosiła mniej niż 40 cm, zostały pominięte z pomiarów z jednostki pływającej. Obszary te zostały opracowane podczas pomiaru linii brzegowej za pomocą techniki GPS/RTK i tachimetrii.

W wyniku pomiaru przeprowadzonego na badanym obszarze otrzymano 7230 pikiet wysokościowych rozmieszczonych na odcinku ok. 2 km. Rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawione zostało na rysunku 1. Dodatkowo, dla ułatwienia późniejszej analizy, zapisywany był czas pomiaru każdej pikiety. Minimalna pomierzona głębokość wyniosła 0,42 m, a maksymalna 9,74 m, zaś średnia głębokość na badanym obszarze wyniosła 1,56 m. Pomiar wykonywany był przy niskich stanach wody przy odczycie na wodowskazie Warszawa Port wynoszącym 100 cm. Dane zostały wyeksportowane z echosondy i poddane dalszej obróbce. Podczas prac związanych z pomiarem linii brzegowej metodami GPS/RTK i pomiarami tachimetrycznymi, oprócz samej linii brzegowej, uzupełniono brakujące szczegóły sytuacyjno-wysokościowe nieznajdujące się na mapach zasadniczych badanego terenu. Dane posłużyły do opracowania numerycznych modeli terenów zalewowych i wykonania przekrojów poprzecznych i podłużnych, na których analizowano zagrożenia powodziowe.

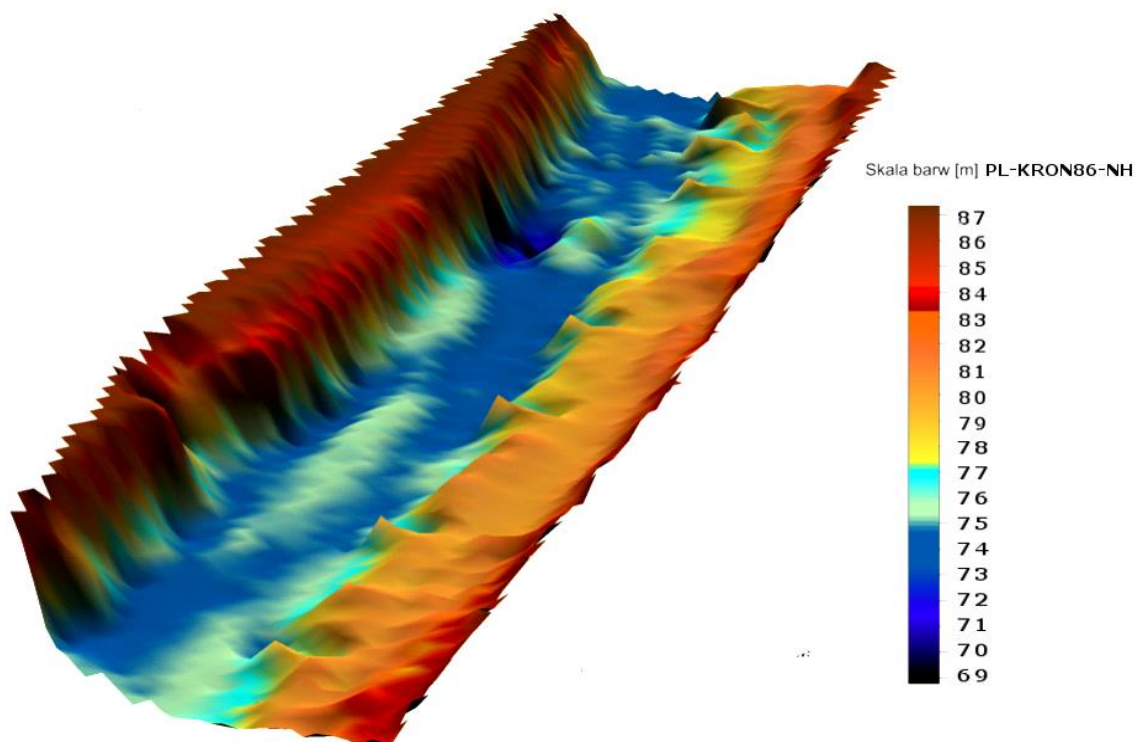




Rys. 2. Pomiar odległości od lustra wody do szczytu pręta (opracowanie własne).

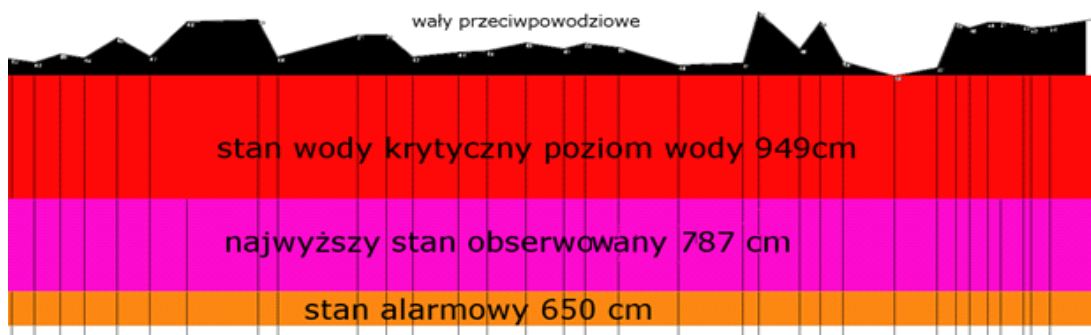
### 3.2. Opracowanie wyników

Dane zgromadzone w czasie pomiarów na profilach pomiarowych zostały zapisywane do plików o formacie CSV, które poddano filtracji i kalibracji uwzględniając odpowiednie poprawki. Efektywnym sposobem analizowania powierzchni są modele TIN (nieregularna sieć triangulacyjna). Wykorzystywane są najczęściej do wizualizacji niejednorodnych powierzchni, bardziej zróżnicowanych w wybranych częściach mierzonego terenu. Pozwalają na zróżnicowanie liczby punktów opisujących powierzchnię w zależności od urozmaicenia danego terenu. W modelu tym przestrzeń przedstawiana jest w postaci siatki przylegających do siebie trójkątów, powstającej wskutek połączenia nieregularnie rozmieszczonych punktów o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  [4, s.8]. W procesie postprocesingu wygenerowano model dna rzeki i model terenów zalewowych. Dodatkowo opracowano model terenów zalewowych na podstawie danych z mapy zasadniczej w skali 1:500 oraz pomiarów uzupełniających metodami GPS/RTK i tachimetrii. Układem współrzędnych opracowania był układ współrzędnych prostokątnych płaskich „PL-2000”. Model dna rzeki oraz terenów zalewowych opracowano w programie Surfer.

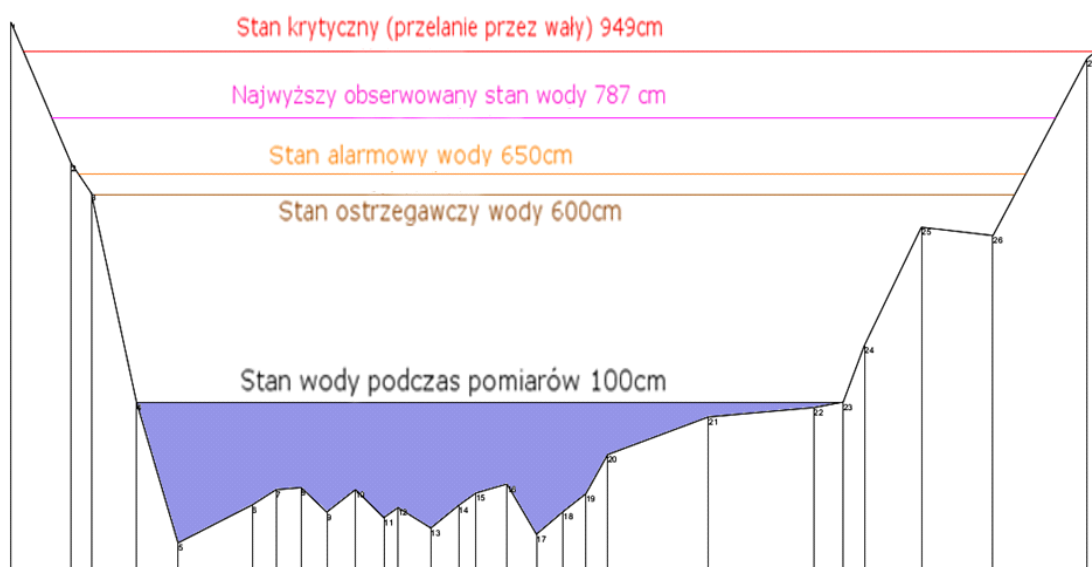


Rys. 3. Model dna rzeki oraz terenów zalewowych. Wysokości w układzie PL-KRON86-NH (opracowanie własne).

Opracowując NMT koryta rzeki powiązano go z terenami zalewowymi, tworząc model łożyska rzeki pomiędzy wałami. Na podstawie wykonanych przekrojów poprzecznych przez dolinę oraz koryto i podłużnych poprowadzonych przez wały przeciwpowodziowe oraz analizy stanu lustra wody, wskazano miejsca zagrożone powodzią. Przykładowy przekrój poprzeczny i podłużny z zaznaczonymi stanami wód oraz stanem zagrażającym przelaniem się przez wały pokazują rysunki 4. oraz 5. Przekroje zostały wykonane w oprogramowaniu CAD/GIS. Aby przekroje były wyraźne i czytelne, należy posłużyć się odpowiednio dobraną skalą. Jeden przekrój wykonuje się w dwóch skalach: w skali podłużnej (skala odległości) oraz w skali poprzecznej (skala wysokości). Dobór skali zależy oczywiście od urozmaicenia rzeźby terenu oraz dodatkowo długości przedstawianego odcinka rzeki. Skala wysokości jest przeważnie dziesięć razy większa niż ustalona skala podłużna [3].



Rys. 4. Wycinek przekroju podłużnego przez wały przeciwpowodziowe z naniesionymi stanami wód. Skala 1:40/2000 (opracowanie własne, pomiar – październik 2013).

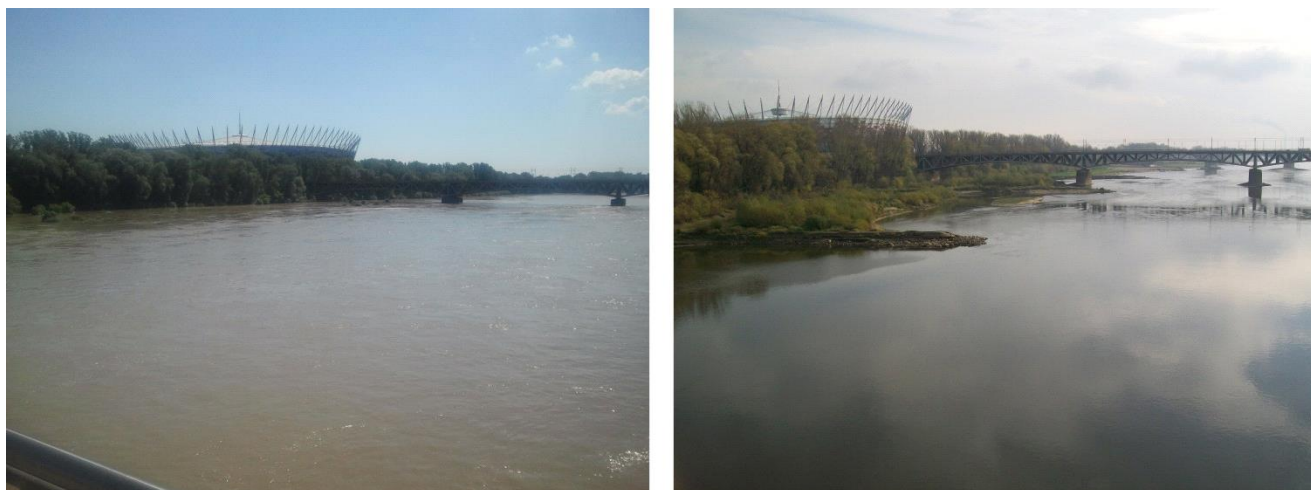


Rys. 5. Przekrój poprzeczny przez dolinę Wisły 512,2 km. Skala 1:100/2000 – od wału do wału. Stan wody 100 cm (opracowanie własne, pomiar – październik 2013).

### 3.3. Pomiar kontrolny.

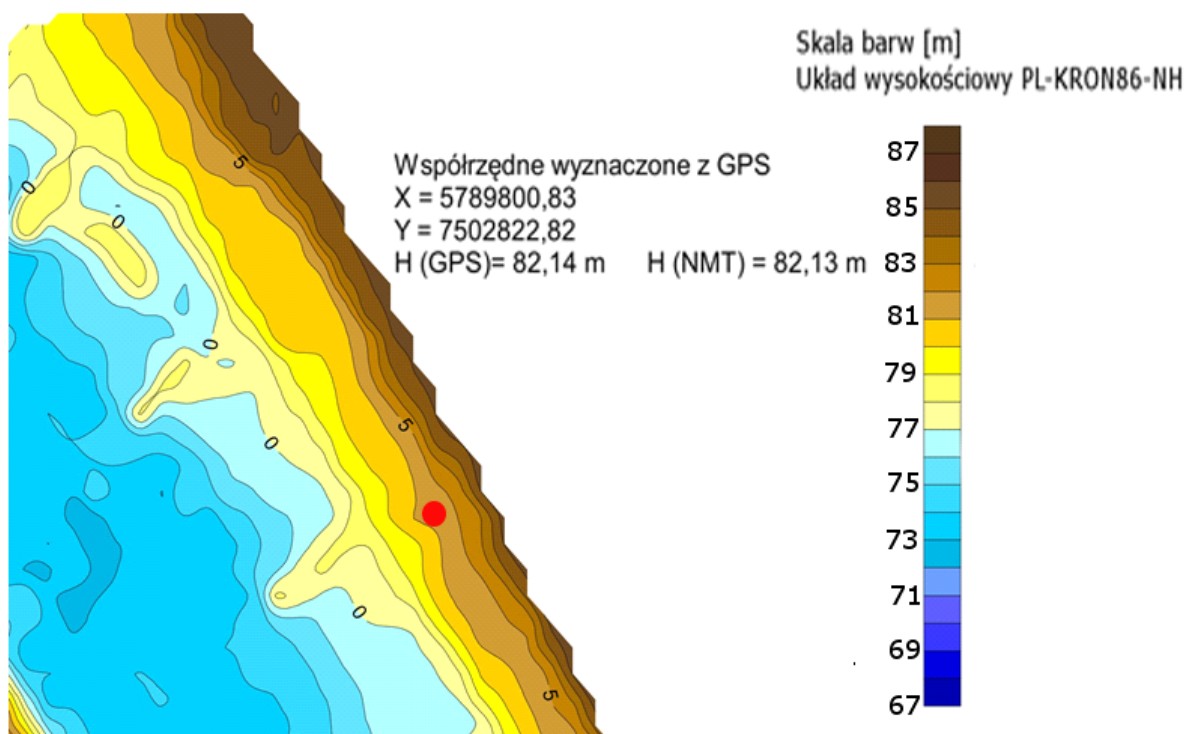
Na przestrzeni ostatnich tygodni tj. maj 2014, obserwowane były zmienne warunki pogodowe. Liczne opady deszczu wpłynęły na podniesienie poziomu wód w dorzeczu południowej Wisły. W nocy z 20 na 21 maja, Wisła na odcinku warszawskim przyjmowała kulminacyjną falę powodziową. Zanotowany wówczas poziom wody wynosił 698 cm na wodowskazy Warszawa-Port. Dnia 22 maja przeprowadzony został pomiar kontrolny pod kątem sprawdzenia wiarygodność opracowanego uprzednio modelu terenu na badanym odcinku Wisły. Pomiar przeprowadzony był przy stanie wody 587 cm. Przy pomocy

odbiornika satelitarnego wyznaczono położenie punktów na wałach oraz określono wysokość zwierciadła wody. Po lewej stronie Wisły wyznaczono położenie punktów na całym badanym odcinku, a ich wzajemna odległość między sobą mieści się w przedziale 50 – 250 m. Ze względu na gęste zadrzewienie występujące na prawym brzegu Wisły, możliwe było wyznaczenie położenia punktów przy pomocy odbiornika satelitarnego od mostu Świętokrzyskiego do mostu Poniatowskiego.

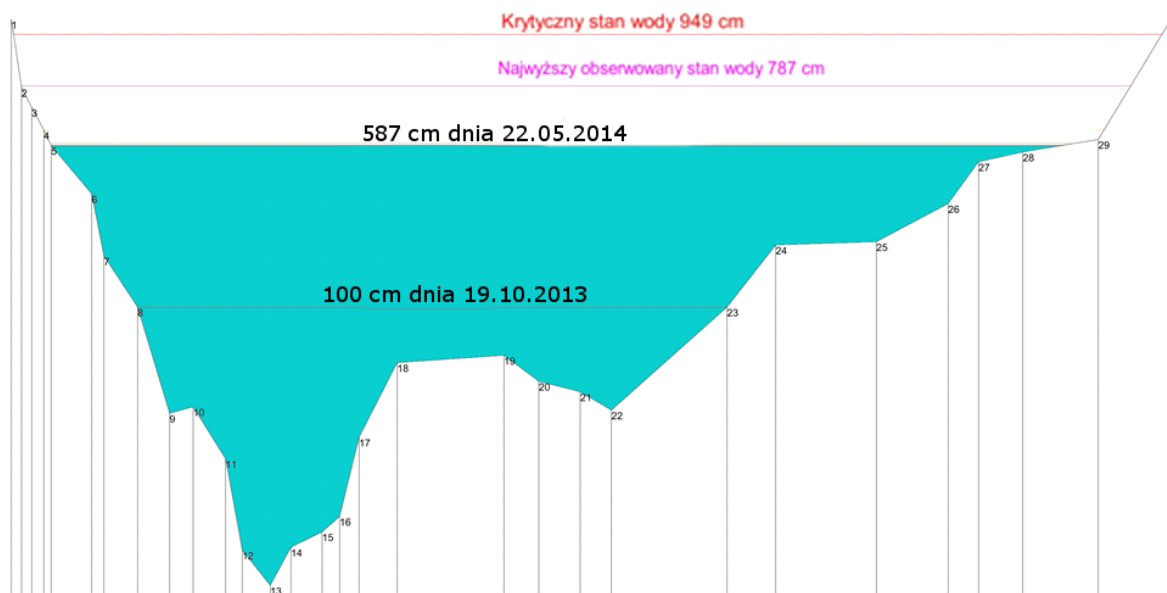


Rys. 6. Widok z mostu Świętokrzyskiego na prawobrzeżną Wisłę. Zdjęcie po lewej - z dnia 22.05.2014 r. stan wody 587 cm. Zdjęcie po prawej - z dnia 19.10.2013 r. stan wody 100cm (opracowanie własne).

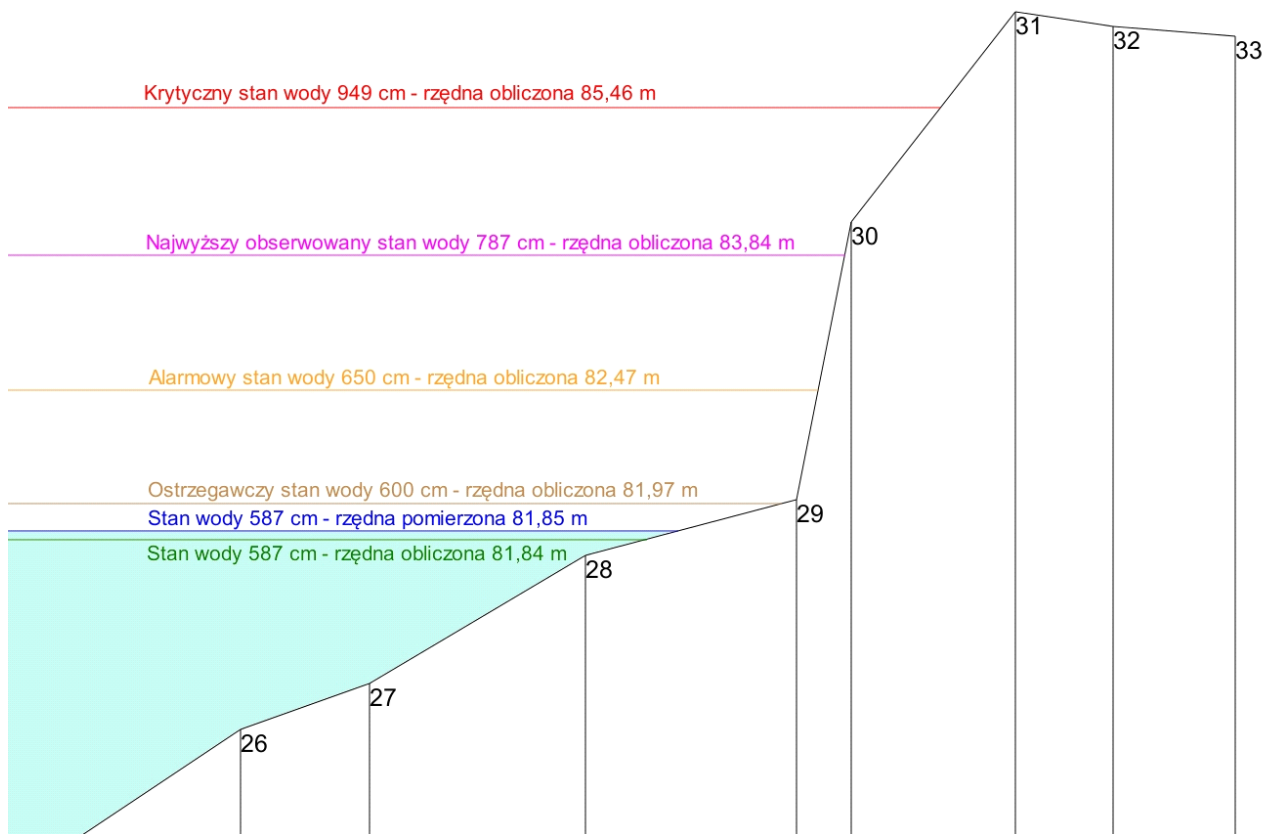
Sprawdzenia wiarygodności opracowanego wcześniej modelu terenu (przy stanie wody 100 cm) wraz z obliczonymi rzędnymi zwierciadła wody dla poszczególnych stanów wód wykonano w dniu 22.05.2014 (przy stanie wody 587 cm) [5] poprzez pomiar zwierciadła wody GPS-em. Następnie otrzymane wyniki (rzędne lustra wody) porównano z odczytanymi z modelu terenu. Poniżej przedstawiony jest przykład na jednym punkcie pomiarowym, znajdującym się w okolicach mostu Poniatowskiego. Różnica wysokości pomiędzy wygenerowanym modelem, a pomiarem kontrolnym wynosiła 1 cm.



Rys. 7. Porównanie rzędnej wyznaczonej z GPS/RTK z rzędną odczytaną z modelu terenu. (opracowanie własne).



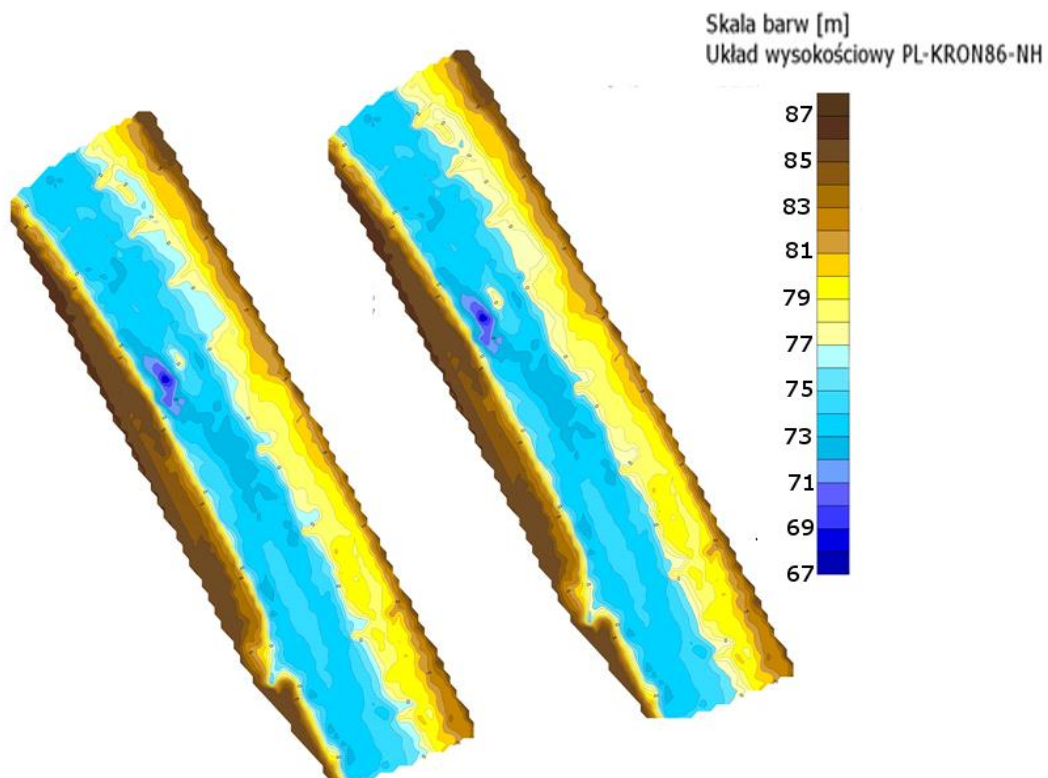
Rys. 8. Przekrój poprzeczny przez dolinę Wisły 511,8 km (okolice mostu Poniatowskiego). Skala 1:100/2000 – od wału do wału. Stan wody 587 cm (opracowanie własne, pomiar – maj 2014).



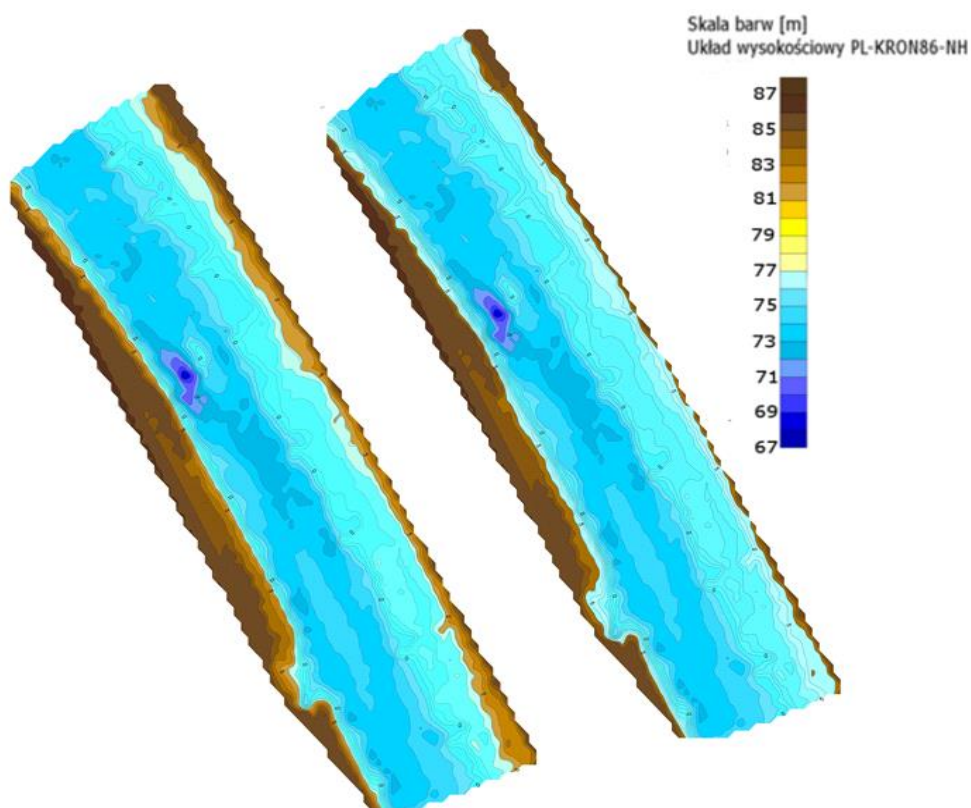
Rys. 9. Fragment przekroju poprzecznego utworzonego w okolicach mostu Świętokrzyskiego z naniesionym stanem wody 587 cm oraz obliczoną i pomierzą rzędną dla tego stanu z dnia 22.05.2014r. Rzędne podane w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH (opracowanie własne).

Podczas pomiarów kontrolnych zastosowano metodę pomiaru GPS/RTK w nawiązaniu do sieci ASG-EUPOS, ponieważ metoda ta pozwala na otrzymanie żądanych dokładności: dla określenia wysokości  $\pm 0,06$  m, a błąd średni wyznaczenia położenia punktu wynosi  $\pm 0,02-0,03$  m.

Prace pomiarowe, wykonywane jesienią 2013 r., mające na celu zniwelowanie zwierciadła wody, wykonane zostały metodą niwelacji geometrycznej o dokładności  $\pm 0,005$  m. 22.05.2014 r. wysokość zwierciadła wody mierzona była przy pomocy GPS/RTK, a dokładność określenia wysokości wyniosła  $\pm 0,06$  m.



Rys. 10. Po lewej stan wody 100 cm z dnia 19.10.2013r., po prawej 56 cm – najniższy obserwowany stan wody (opracowanie własne).



Rys. 11. Po lewej stan wody 587 cm z dnia 22.05.2014 r. , po prawej 787 cm – najwyższy zanotowany (opracowanie własne).

#### 4. Wnioski

Analizując poszczególne etapy prac badawczych można wyciągnąć szereg wniosków. Na podstawie pomiaru kontrolnego, przy stanie wezbraniowym Wisły z maja 2014, udowodniono poprawność opracowanego modelu koryta i łożyska rzeki na podstawie pomiaru z jesieni 2013. Należy zauważyć, że pomiar jesienny był wykonywany przy tzw. „niżówce” przy stanie wody 100 cm [5] na wodowskazie Warszawa Port, a pomiar kontrolny przy stanie wody 587 cm [5]. Cel prac badawczych przyjęty jesienią 2013 roku i ich wyniki, związany z pokazaniem poziomu zwierciadła wody zagrażającemu przelaniem się przez wały, został potwierdzony poprzez pomiary kontrolne w dniu 22 maja 2014. Prace badawcze pokazały możliwości wykorzystania pomiarów sonarowych zintegrowanych z pomiarami GPS oraz tradycyjnych technik geodezyjnych GPS/RTK i tachimetrii do opracowania numerycznych modeli terenu koryta rzeki wraz z linią brzegową i ich powiązanie ze stanami lustra wody. Wyniki opracowania mogą służyć do stworzenia systemu informacji dla służb kryzysowych, wspomagania ochrony miejsc zagrożonych powodzią oraz wykonywania prac konserwacyjnych i hydrotechnicznych.

#### LITERATURA

- [1] - Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o żegludze śródlądowej (Dz. U. z 2006 r. Nr 123, poz. 857, z późn. zm.)
- [2] - IHO Standard for hydrographic surveys (S-44), 5<sup>th</sup> edition, luty 2008,  
[http://www.iho-ohi.net/iho\\_pubs/standard/S-44\\_5E.pdf](http://www.iho-ohi.net/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf)
- [3] - J. Gocał, *Geodezja inżynierska* t.1, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Wrocław 1994
- [4] - T. Templin, D. Popielarczyk, *Tworzenie numerycznego modelu dna zbiornika wodnego w oparciu o jednowiązkowy sondaż hydroakustyczny i system DGPS*, Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr. 2008 7(3), 3–13
- [5] - Informacje na temat stanu wody w Wiśle na serwisie IMiGW: