Identyfikacja podstawowych działań rewitalizacyjnych w dolinie górnej Wisły wraz oceną wpływu wybranych rozwiązań na maksymalne przepływy i rzędne zwierciadła wody na przykładzie powodzi z maja 2010 roku

Załącznik 2

Projekt: Rewitalizacja, ochrona bioróżnorodności i wykorzystanie walorów starorzeczy Wisły, zatrzymanie degradacji doliny górnej Wisły jako korytarza ekologicznego

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY PRZEZ SZWAJCARIE W RAMACH SZWAJCARSKIEGO PROGRAMU WSPÓŁPRACY Z NOWYMI KRAJAMI CZŁONKOWSKIMI UNII EUROPEJSKIEJ

Fundacja Dzika Polska na zlecenie Towarzystwa na rzecz Ziemi

Zespół autorski:

Karol Ciężak

Wiesław Król

Robert Wawręty

Janusz Żelaziński

Warszawa, czerwiec 2014

Spis treści

1. Opis zastosowanego modelu …….. 3
2. Kalibrowanie modelu …… 4
3. Identyfikacja polderów i możliwych do objęcia relokacją odcinków obwałowań …… 10
4. Krzywe napełnienia i wyniki optymalizacji wybranych polderów …….. 16
5. Podsumowanie wstępnej analizy …… 29
6. Obliczenia właściwe i ich wyniki …… 33
7. Wykorzystanie polderów w modelu …… 43
8. Oszacowanie wpływu polderów na maksymalne rzędne poniżej ujścia Dunajca …… 43
9. Możliwe do wykonania pozostałe działania rewitalizacyjne w małopolskiej dolinie górnej Wisły mające wpływ na wielkość rzędnych fali powodziowej nie objęte modelowaniem …. 44
10. Podsumowanie …….. 44

1. Opis zastosowanego modelu

Dla oceny wpływu rewitalizacji górnej Wisły na kształtowanie się przepływów maksymalnych opracowano model hydrodynamiczny odcinka Wisły pomiędzy wodowskazami IMGW w Nowym Bieruniu w km 919+810 (wg MPHP) oraz Popendzynką km 784+640.

Dla zbudowania modelu wykorzystano przekroje poprzeczne doliny Wisły i Raby uzyskane w ramach projektu Banku Światowego w latach 1999 i 2000. Dopływy boczne zostały uwzględnione, jako dopływy skupione zasilające Wisłę hydrogramami przepływów. Uwzględniono w tym przypadku hydrogramy przepływów dla:

- Przemszy – z profilu Jeleń,
- Soły w Oświęcimiu,
- Skawy w Zatorze,
- Skawince w Radziszowie,
- Balicach na Rudawie.

Zasilanie modelowanego odcinka Raby odbywało się w profilu wodowskazu w Proszówkach.

Z uwagi na charakter pracy ustalono, że obliczenia będą prowadzone w oparciu a falę powodziową z maja 2010 roku, jako najlepiej udokumentowaną oraz najbardziej zbliżoną do warunków, jakie opisują otrzymane przekroje poprzeczne doliny Wisły.

Koncepcja modelu oraz sposób doboru warunków brzegowych zdeterminowany był zadaniem, jakiemu model ma służyć a więc ograniczeniu stanów lub przepływów maksymalnych. Ponieważ jedną z metod jest okresowe zatrzymanie przepływów w wybranych i przygotowanych na ten cel miejscach, zwrócono uwagę na uzyskanie maksymalnej zgodności wielkości przepływów w rejonie Krakowa.

Do obliczeń wykorzystano aplikacje HEC-RAS (wersja 4.1.0) stworzoną przez Hydrologic Engineering Center U.S Army Corps of Engineers (http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/) z uwagi na:

- szeroki zakres zastosowania,
- możliwości modelowania urządzeń wodnych,
- posiadanie własnej bazy danych z wieloma narzędziami do analizy wyników obliczeń,
- darmowy dostęp.

Szczegółowy opis podstaw teoretycznych wykorzystanych w aplikacji HEC-RAS można znaleźć na stronie: www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf a w języku polskim np. na stronie: www.is.pw.edu.pl/plik/501/USM_w3_hydraulika_stosowana.pdf.

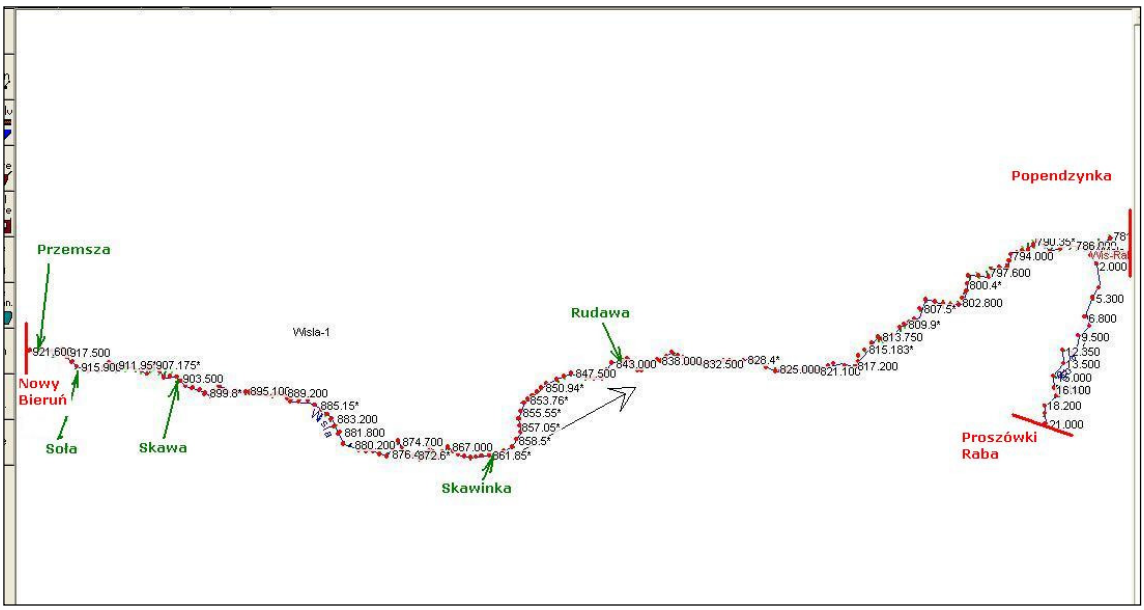
Z punktu widzenia obliczeniowego przy takich samych warunkach granicznych obliczenia aplikacją HEC-RAS nie powinny się różnić od wyników otrzymanych z oprogramowania MIKE-11.

Dla właściwego modelowania odcinka rzeki niezbędne były odpowiednie zestawy danych obserwacyjnych. W tym przypadku posłużono się danymi o stanach wody (przepływach) zbieranymi z portalu www.pogodynka.pl/podest/ na bieżąco w trakcie powodzi w roku 2010, a także z publikacji **„DORZECZE WISŁY – MONOGRAFIA POWODZI MAJ-CZERWIEC".**

Należy podkreślić, iż do modelowania wpływu polderów i zbiorników retencyjnych na maksymalne stany/przepływy na dłuższym odcinku rzeki poniżej polderu/zbiornika **nie można w sposób uzasadniony wykorzystywać tak zwanych „fal hipotetycznych".** Trudno bowiem w stosunku do fal hipotetycznych w sposób sensowny ustalić hydrogramy dopływów bocznych oraz przesunięcia czasowe pomiędzy hydrografami rzeki głównej i dopływów.

2. Kalibrowanie modelu

Zbudowany model składa się z ponad 190 przekrojów Wisły oraz 16 przekrojów na Rabie wraz z pełnym modelem hydrodynamicznym węzła. Uproszczony schemat obliczeniowy przedstawiono na rys 1. Kolorem czerwonym oznaczono wodowskazy stanowiące warunki brzegowe modelu zaś zielonym dopływy Wisły uwzględnione, jako dopływ skupiony.



Rys. 1. Uproszczony schemat obliczeniowy modelu.

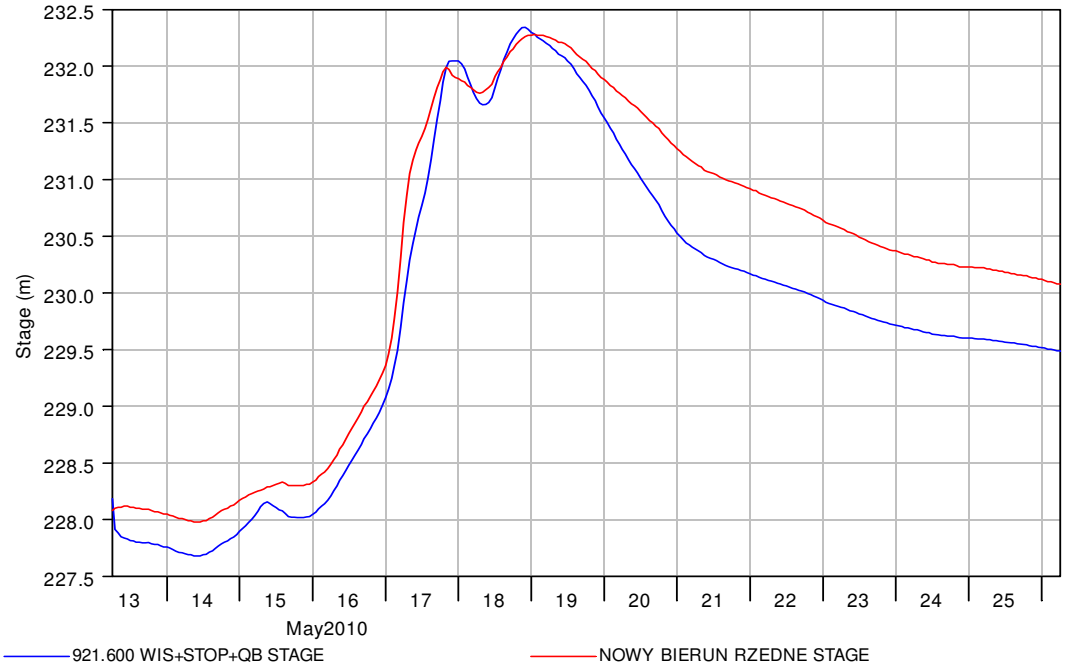
Na modelowanym odcinku znajduje się 6 stopni wodnych na istniejącej drodze wodnej górnej Wisły. Uwzględnione one zostały, jako obiekty mające swój wpływ na transformację przepływów, ale nie uwzględniono ich aktualnej pracy w czasie powodzi (stopień wykorzystania zamknięć). Oznacza to, że zastosowano przy modelowaniu, transformacji zasadę, według której stopień utrzymuje normalny poziom piętrzenia, dokąd może a następnie (przy wzroście poziomu) otwiera wszystkie zamknięcia tak by nie powodować przeszkód w przejściu wód powodziowych.

Na etapie wstępnych obliczeń przyjęto dla całego odcinka Wisły i Raby stałe oraz jednakowe współczynniki szorstkości dla całych części korytowych oraz międzywala.

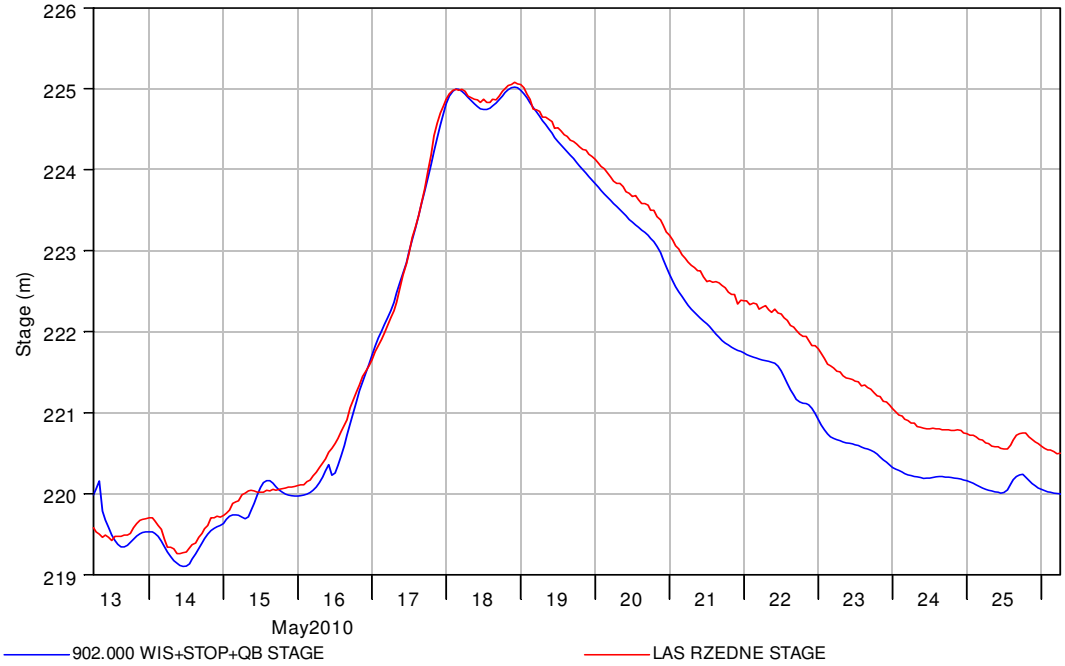
Na wstępie zoptymalizowane współczynniki szorstkości dla odcinków początkowych w oparciu o analizę maksymalnej zgodności hydrogramów rzędnych w przekrojach brzegowych. Wynikiem tej analizy było stwierdzenie znacznych problemów z dopasowaniem rozwiązań do wyników obserwacji hydrologicznych. Zapewne wynikało to ze stosowania w czasie powodzi przez IMGW krzywych przepływów, które nie obejmowały tak wysokiej strefy przepływów. Różnice w rozwiązaniach zostały zaakceptowane do wartości różnicy przepływów nie wyższej niż 10% wielkości kulminacji. Akceptacji dokonano również z takich powodów jak:

- przekroje obliczeniowe nie znajdowały się dokładnie w miejscach przekrojów wodowskazowych,
- wykorzystane przekroje nie były aktualizowane od czasu ich pomiarów w latach 1999 – 2001,
- rzeczywista praca stopni wodnych mogła się różnić od prostej zasady utrzymania normalnego poziomu piętrzenia i ewentualnego otwarcia wszystkich zamknięć,
- odtworzenie przebiegu zjawiska w czasie powodzi nie było zadaniem tego projektu gdzie należy wykazać na maksymalnie zbliżonym do rzeczywistości modelu efekt ewentualnych zmian w korycie na transformację wysokich przepływów.

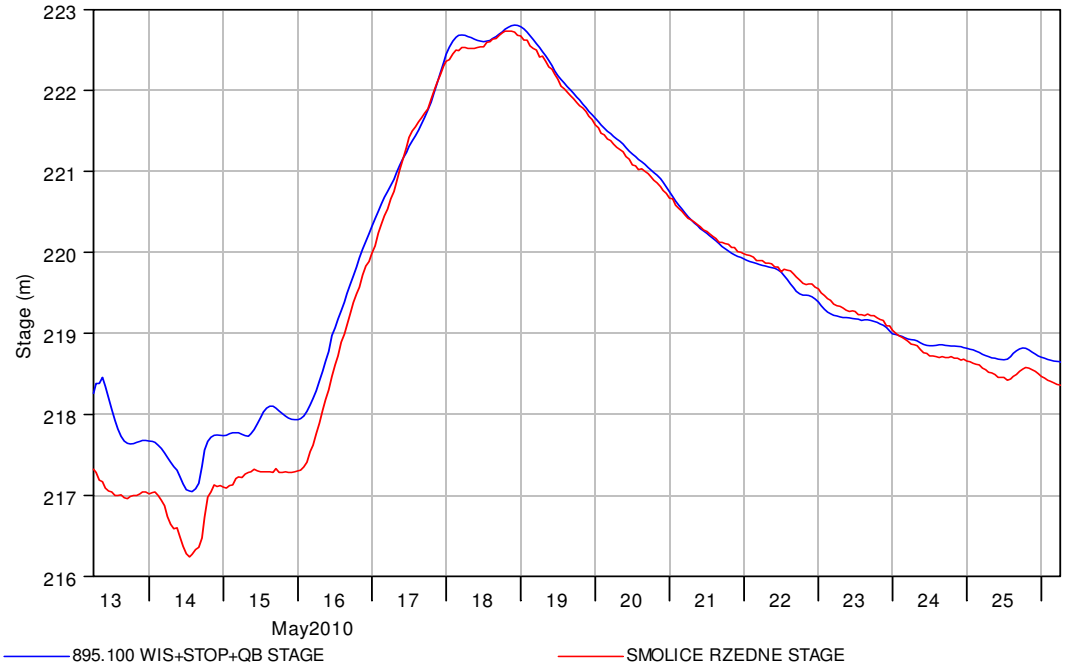
Poniżej przedstawiono wyniki wstępnych obliczeń modelem w warunkach zbliżonych do naturalnych.



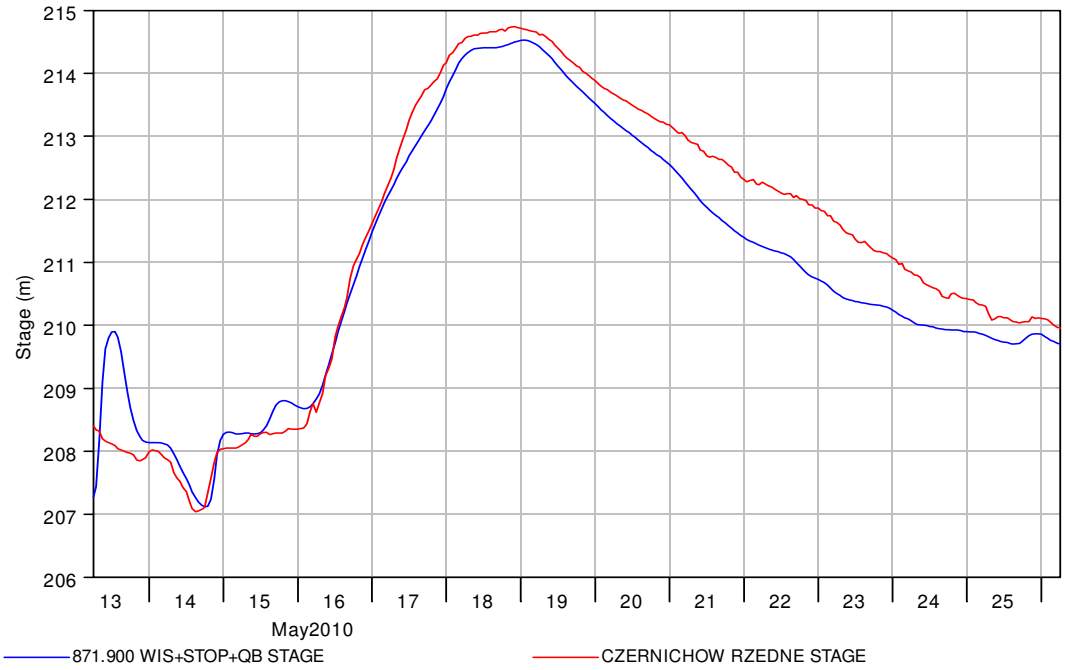
Rys. 2. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu w Nowym Bieruniu. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



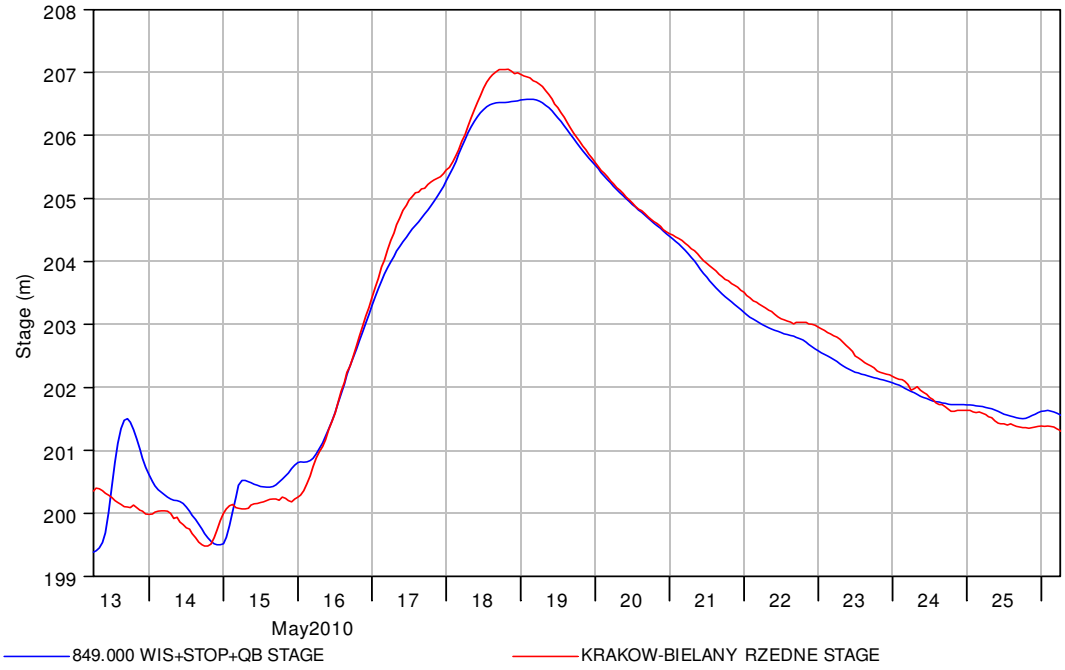
Rys. 3. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu Las. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



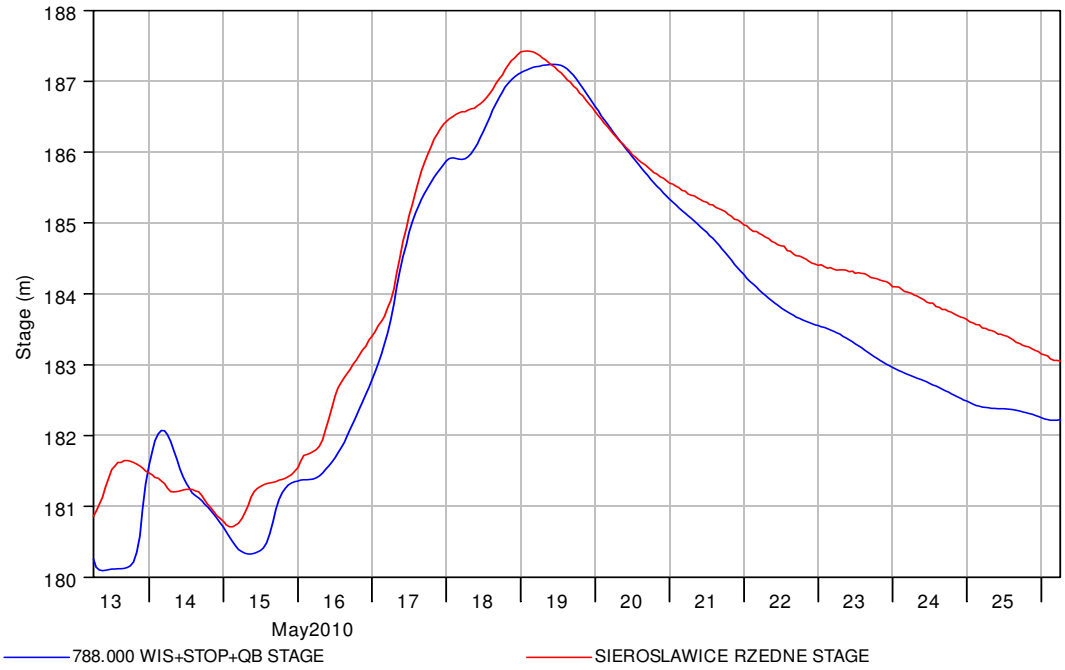
Rys. 4. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu Smolice. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



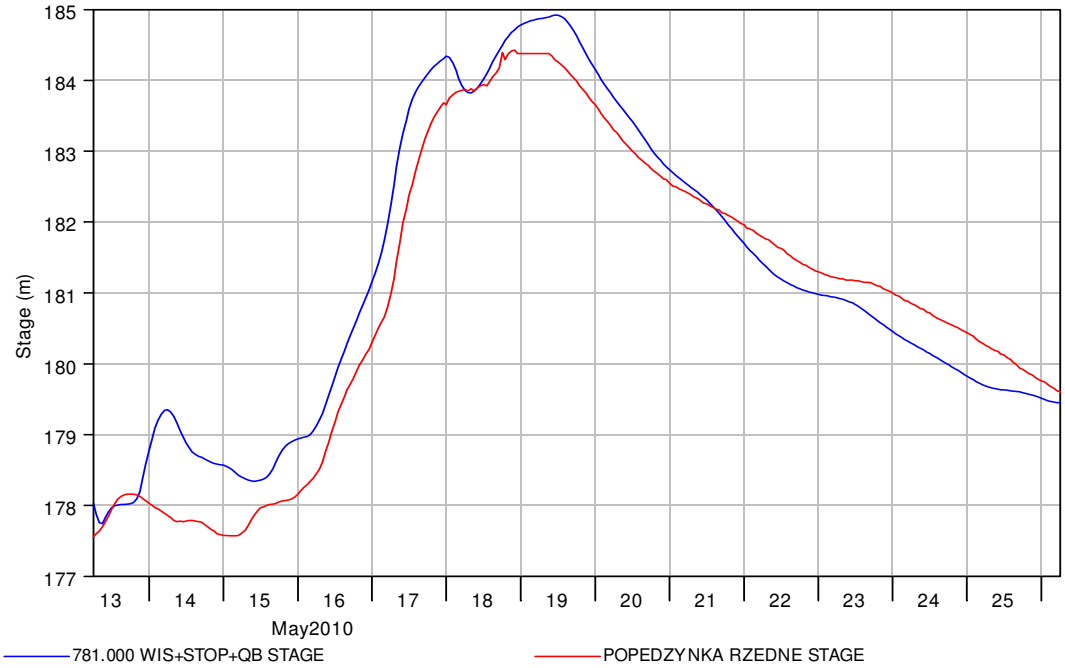
Rys. 5. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu w Czernichowie. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



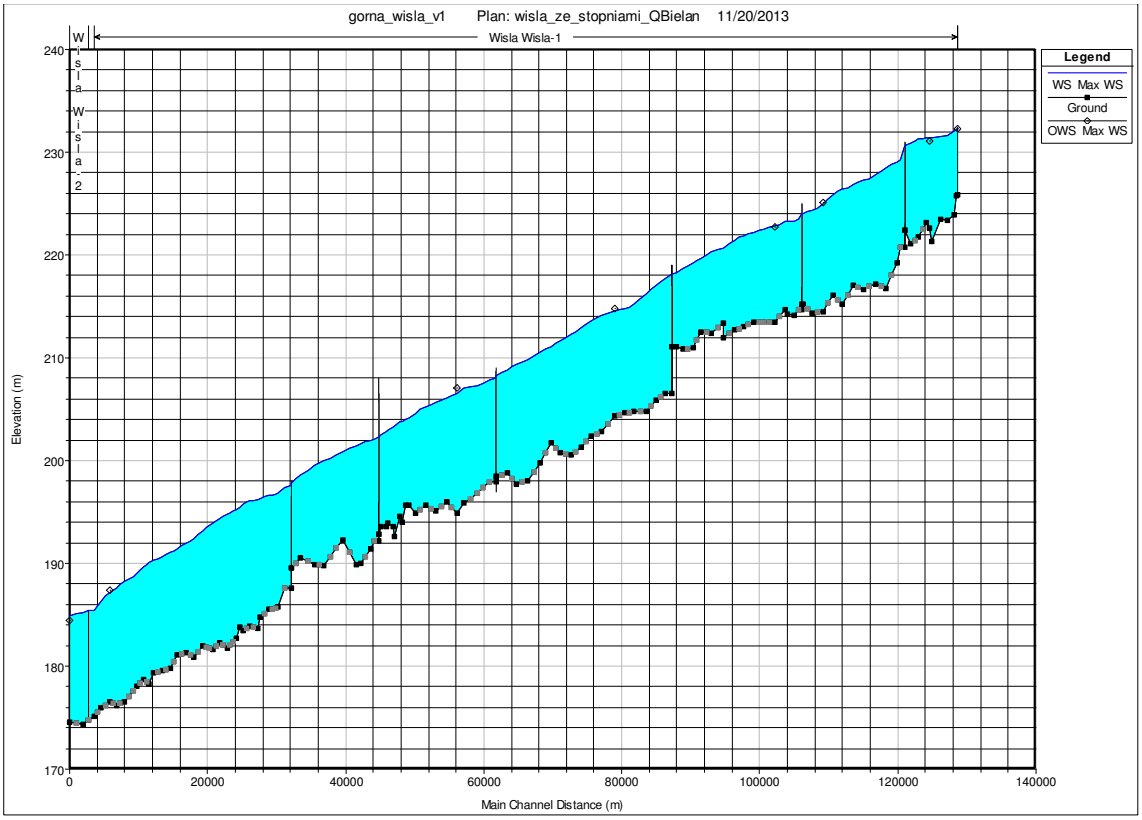
Rys. 6. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu Kraków – Bielany. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



Rys. 7. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu Sierosławice. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



Rys. 8. Porównanie hydrogramów rzędnych dla wodowskazu Popendzynka. Kolor niebieski wartości obliczone, kolor czerwony wartości obserwowane.



Rys. 9. Zwierciadło wody na odcinku modelowym przy maksymalnym napełnieniu.

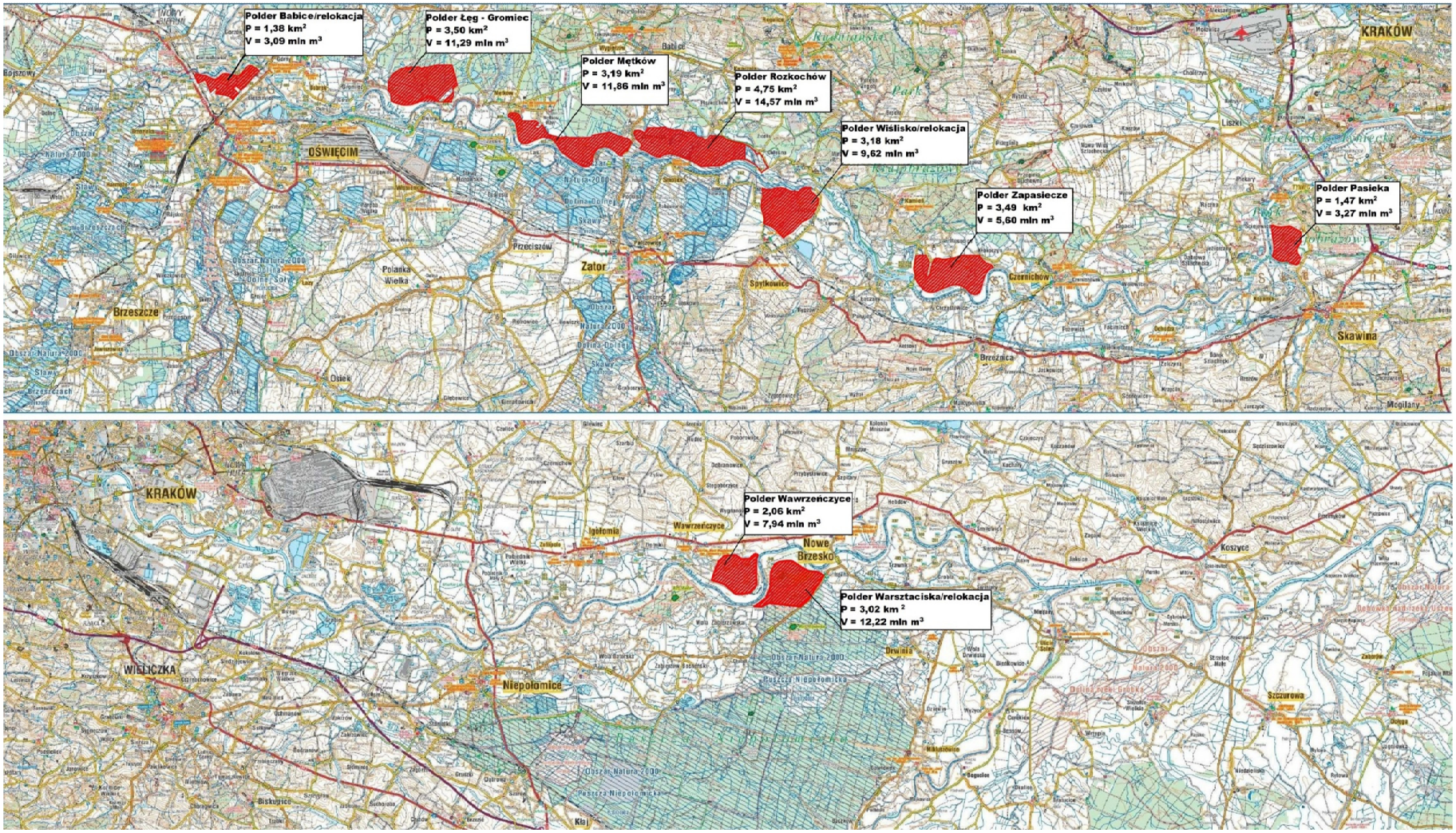
3. Identyfikacja polderów i możliwych do objęcia relokacją odcinków obwałowań

Identyfikację lokalizacji potencjalnych miejsc wykonania polderów przeprowadzono w wyniku kilku wizji terenowych poprzedzonych analizą map satelitarnych dostępnych na Google Earth. W trakcie wizyt sporządzono dokumentację fotograficzną, która stanowi załącznik do niniejszego opracowania. Poszukiwano terenów odciętych wałami od koryta Wisły, a jednocześnie niezabudowanych i ekstensywnie użytkowanych tak by ich okresowe zalewanie nie powodowało znaczących szkód. Istotnymi kryteriami była duża powierzchnia oraz niskie rzędne terenu, co zapewnia objętość polderu pozwalającą w sposób znaczący redukować wysokość kulminacji powodzi. W kilku miejscach, z uwagi na lokalne obniżenia rzędnych obwałowań założono konieczność dokonania niewielkiego odcinkowego wyrównania ich korony. Ponadto miejsca identyfikowano pod kątem możliwości relokacji obwałowań mając na uwadze uzyskanie jak największych efektów przyrodniczych bez jednoczesnego, istotnego pogorszenia bezpieczeństwa powodziowego.

W trakcie programu zidentyfikowano ostatecznie 9 miejsc potencjalnych polderów i dokonano oszacowania ich powierzchni oraz pojemności (tab. 1, rys. 1). Do tego celu wykorzystano numeryczny model terenu opracowany w systemie Civil 3D na podstawie danych pozyskanych z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie (rok sporządzenia materiałów źródłowych: zdjęcia: 2009, NMT: 2004, zaktualizowany w 2009). Rzędne wysokości obwałowań odczytanych z modeli numerycznych weryfikowano następnie w oparciu o mapy udostępnione przez Wojewódzki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych z Krakowa stanowiące załącznik do projektów budowlanych. W praktyce kilka danych wysokościowych obwałowań w modelach cyfrowych terenu było niektualnych, z uwagi na przeprowadzone w ostatnich latach ich remonty, co wymagało aktualizacji danych wysokościowych.

Na podstawie opracowanej powierzchni TIN (Triangulated Irregular Network) dokonano obliczeń pojemności z wykorzystaniem algorytmów AutoCad Civil 3D-objętości metodą przyrostową. Do obliczenia objętości dla tabeli objętości przyrostowych użyto metody Average End Area oraz metody Conic Approximation.

Metoda Average End Area pozwala obliczyć objętość pomiędzy dwoma przekrojami. Powierzchnie przekrojów poprzecznych są uśredniane i mnożone przez dzielącą je odległość w celu obliczenia objętości.



Rys. 10. Schemat rozmieszczenia poddanych symulacjom polderów oraz relokowanych obwałowań.

Metoda Average End Area jest wyrażona przez poniższe równanie:

$$V = \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L$$

gdzie V oznacza objętość obliczaną na podstawie dwóch powierzchni końcowych A1 i A2, a L oznacza odległość pomiędzy dwiema powierzchniami.

Metoda Conic Approximation pozwala obliczyć objętość pomiędzy dwiema powierzchniami przekroju.

Metoda Conic Approximation jest wyrażona przez poniższe równanie:

$$V = \left(\frac{h}{3}\right)(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$$

gdzie V oznacza objętość obliczaną na podstawie dwóch powierzchni A1 i A2, a h oznacza odległość pomiędzy dwiema powierzchniami.

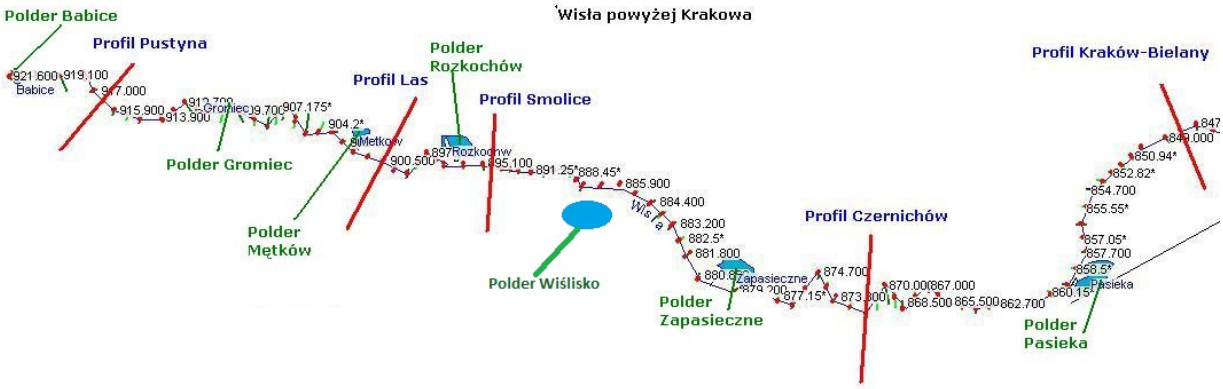
Maksymalne pojemności polderów wraz z powierzchniami i z opisem lokalizacji zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Powierzchnia i maksymalna objętość polderów.

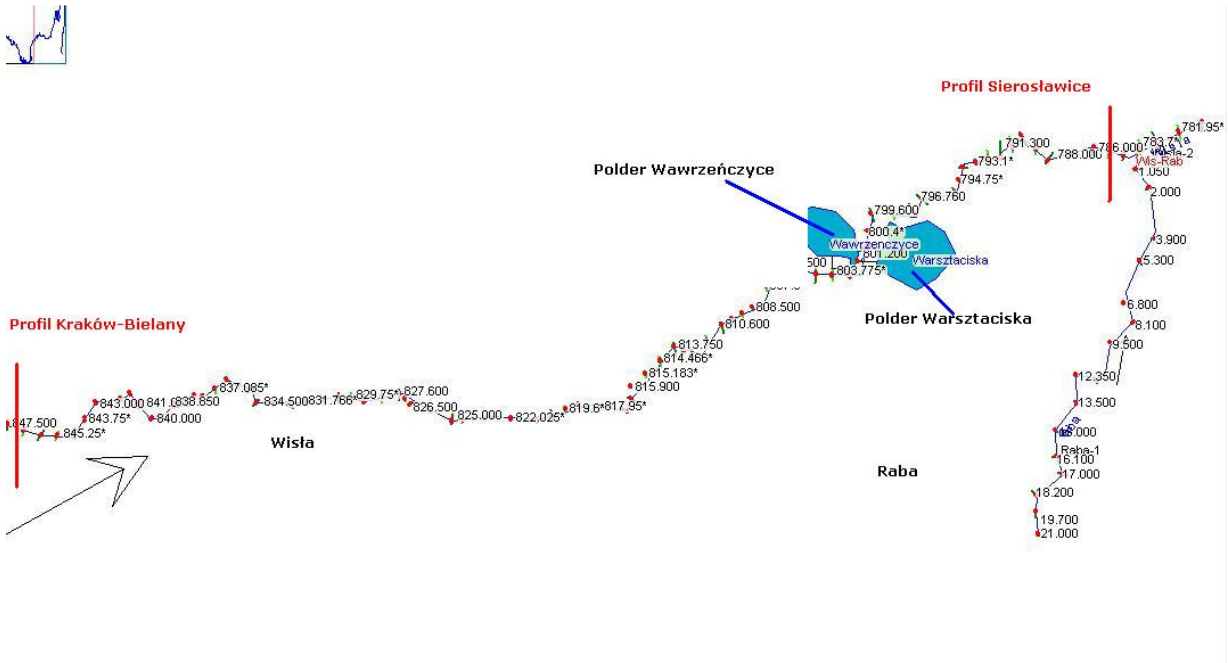
Nazwa polderu	Lokalizacja	Powierzchnia	Objętość polderu przy określonej rzędnej	Ilość na stałe zamieszkanych obiektów do ew. usunięcia	Współrzędne wlotu przyjęte do obliczeń hydrologicznych
Babice	Województwo małopolskie, gmina Oświęcim, obręb Babice; województwo śląskie, gmina Bieruń, obręb Bieruń Nowy; pomiędzy drogą wojewódzką nr 950 Oświęcim - Tychy a nasypem kolejowym linii Oświęcim- Chrzanów	1,38 km^2	V 231.55 = 3,09 mln m^3	1 opuszczone, zniszczone siedlisko	N 50°3'47.62" E 19°11'50.99"
Łęg - Gromiec	Województwo małopolskie, gmina Libiąż, obręb Gromiec, Łęg. Zlokalizowany pomiędzy miejscowością Gromiec a Mętków. W północnej części ograniczony obszarem leśnym.	3,50 km^2	V 229.43 = 11,29 mln m^3	0	N 50°3'12.57" E 19°18'21.58"
Mętków	Województwo małopolskie Gmina Babice, obręb Mętków, Jankowice. Zlokalizowany pomiędzy miejscowością Mętków a Jankowice. W północnej i północno wschodniej części ograniczony obszarem leśnym.	3,19 km^2	V 226.08 = 11.86 mln m^3	0	N 50°2'23.83" E 19°23'31.24"
Rozkochów	Województwo małopolskie gmina Babice, obręb: Rozkochów, Jankowice, gmina	4,75 km^2	V 222.25 = 14,57 mln m^3	0	N 50°2'7.42" E 19°26'44.12"

	Alwernia, obręb: Okleśna oraz w gminie Zator obręb Smolice i Miejsce. Zlokalizowany na wysokości miejscowości Rozkochów pomiędzy miejscowościami Jankowice w gminie Babice a miejscowością Okleśna w gminie Alwernia. Znaczną cześć polderu zajmują żwirownie należące do Krakowskich Zakładów Eksploatacji Kruszywa położone w zakolu A i zakolu B - terytorialne położone w gminie Zator. Polder zlokalizowany na obszarze Natura 2000 PLB120005 Dolina Dolnej Skawy.				
Wiślisko	Województwo małopolskie gmina Spytkowice obręb: Miejsce oraz gmina Alwernia, obręb: Okleśna. Zlokalizowany na wysokości miejscowości Spytkowice w zakolu starorzecza Wiślisko - Miejsce. W znacznej części położony na obszarze Natura 2000 PLB120005 Dolina Dolnej Skawy.	3,18 km^2	V 220.55 = 9,62 mln m^3	5 w tym 2 opuszczone, zniszczone siedliska	N 50°2'7.42" E 19°26'44.12"
Zapasiecze	Województwo małopolskie, gmina Czernichów obręb: Rusiocice Kłokoczyn. Zlokalizowany pomiędzy miejscowościami Rusicie i Kłokoczyn. Część polderu zajmuje starorzecze, jego zachodnia granica oparta została o istniejąca drogę Łączany Kamień.	3,49 km^2	V 214,85 = 5,60 mln m^3	7	N 49°59'30.60" E 19°38'31.13"
Pasieka	Województwo małopolskie, gmina miejska m. Kraków obręb: Tyniec. Zlokalizowany pomiędzy ujściem rzeki Skawinka do Wisły a wzniesieniem Bogucianka. Znaczną część polderu zajmuje istniejący staw. Polder zlokalizowany w przeważającej części na obszarze Bielańsko Tynieckiego Parku Krajobrazowego.	1,47 km^2	V 209,20 = 3,27 mln m^3	0	N 49°59'27.2" E 19°47'28.39"
Wawrzeńczyce	Województwo małopolskie, Gmina Igołomia-Wawrzeńczyce obręb: Wawrzeńczyce. Zlokalizowany w sąsiedztwie miejscowości Wawrzeńczyce. Od strony północnej ograniczony drogą krajowa nr 79.	2,06 km^2	V 190,75 = 7,94 mln m^3	0	N 50°5'41.77" E 20°20'3.1"
Warsztaciska	Województwo małopolskie gmina Drwinia obręb: Ispina Zlokalizowany na obszarze	3,02 km^2	V 189.90 = 12,22 mln m^3	0	N 50°6'24.96" E 20°20'55.8"

	Puszczy Niepołomickiej, obszarze Natura 2000 PLB120002 . W obszarze polderu zlokalizowany jest również rezerwat przyrody Wiślisko Kobyle.				
	SUMA	**26,04 km²:** - 20,96 km² przed Krakowem - 5,08 km² poniżej Krakowa	**79,46 mln m³:** - 59,30 mln m³ przed Krakowem - 20,16 mln m³ poniżej Krakowa	**13 z czego 3 opuszczone siedliska**	



Rys. 11.A. Lokalizacja polderów oraz profili kontrolnych na odcinku Wisły powyżej Krakowa.



Rys. 11.B. Lokalizacja polderów oraz profili kontrolnych na odcinku Wisły poniżej Krakowa.

W kolejnym etapie wytypowano również odcinki rzeki objęte możliwą do przeprowadzenia relokacją obwałowań na wysokości następujących polderów (wg kilometraża modelu):

1) polder Babice: km 921.6 – 919.65

2) polder Wiślisko: km 886.8 – 885.00

3) polder Warsztaciska: km 801.2 – 803.3

Zamiast dobudowania w powyższych miejscach zewnętrznych obwałowań tworzących polder zaproponowano przesunięcie starego obwałowania w ich miejsce.

W niżej opisanych wynikach obliczeń wpływu pracy polderów na transformację fali powodziowej w korycie Wisły przyjęto następujące zasady:

- Dla otrzymanych krzywych napełnienia polderów (rysunki poniżej) zoptymalizowano rzędną oraz szerokość jazu wlotowego tak by efekt obniżenia maksymalnego przepływu (dla fali z roku 2010) był największy.
- W przypadku, gdy rzędne maksymalne w korycie są wyższe niż maksymalne krzywej napełnienia polderu – zastosowano ekstrapolację liniową.
- Efekt działania polderów i relokacji obwałowań oceniano na najbliższym profilu wodowskazowym znajdującym się poniżej wlotu polderu (zaznaczone na rysunkach). Ponadto skuteczność działania polderów przedstawiono wzdłuż całego profilu podłużnego pomiędzy Babicami a Nowym Brzeskiem.

- Takie podejście do obliczeń daje maksymalne działanie polderu, ale tylko dla fali zaobserwowanej w roku 2010. Przy niższych kulminacjach efekt obniżenia może nie wystąpić w ogóle a przy wyższych być mniejszy.

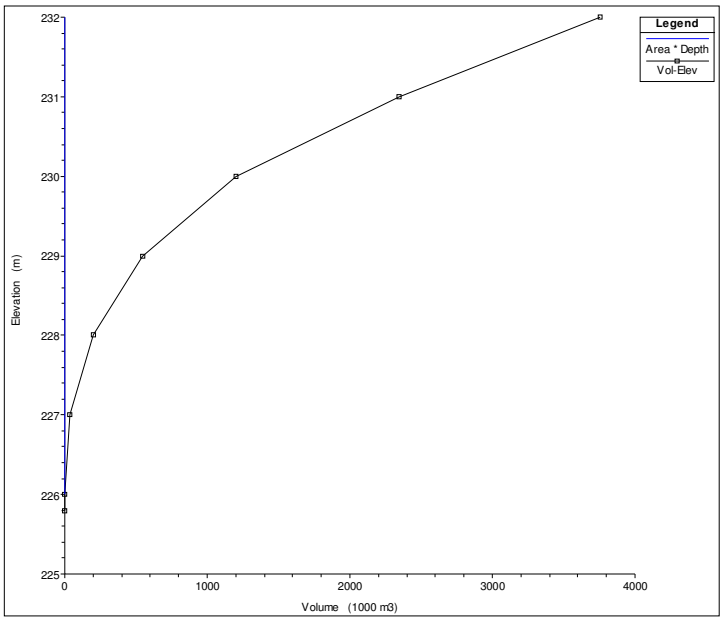
- Niewykorzystana pojemność retencyjna wyniosła blisko 13 mln m^3 i wynikało to z faktu, iż polderu nie można grawitacyjnie napełnić do rzędnej wyższej niż maksymalna rzędna symulowanej fali (w tym przypadku fali z 2010 roku). W przypadku wystąpienia fali o kulminacji wyższej niż w 2010 roku pojemność ta może być w części lub w całości wykorzystana. Teoretycznie można rozważać możliwość budowania kanału derywacyjnego (rozwiązanie stosowane w przypadku przepływowych elektrowni wodnych), co pozwoliłoby na wykorzystywanie pełnej pojemności polderów niezależnie od wysokości wezbrania. Rozwiązanie takie wymagałoby niezwykle precyzyjnego sterowania napełnianiem polderów, a ponadto budowa kanałów derywacyjnych z urządzeniami sterującymi nie wydaje się rozwiązaniem sensownym ekonomicznie.

4. Krzywe napełnienia i wyniki optymalizacji wybranych polderów

Poniżej przedstawiono wyniki optymalizacji dla 7 spośród 9 zidentyfikowanych polderów. Ponadto zaprezentowano krzywe napełnienia dla wszystkich analizowanych polderów.

- **Polder Babice**

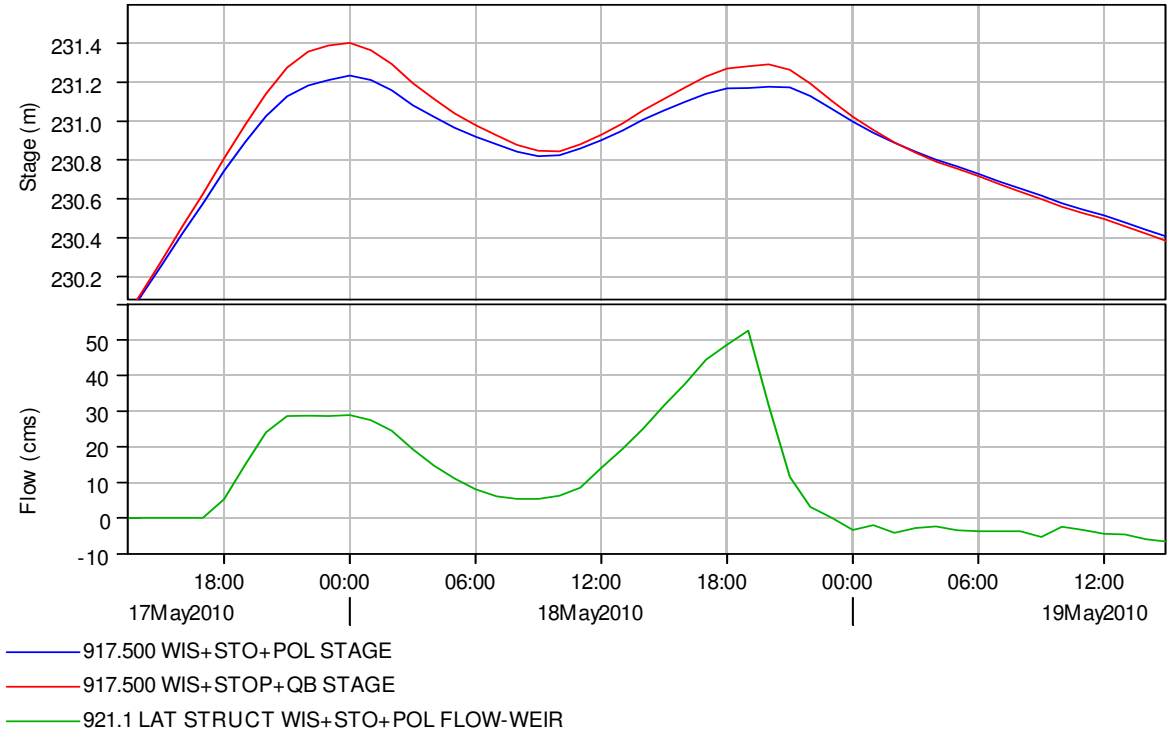
Kilometr wlotu: 921.1



Rys. 12. Krzywa napełnienia polderu Babice.

Tab. 2. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Babice w oparciu o profil Pustynia.

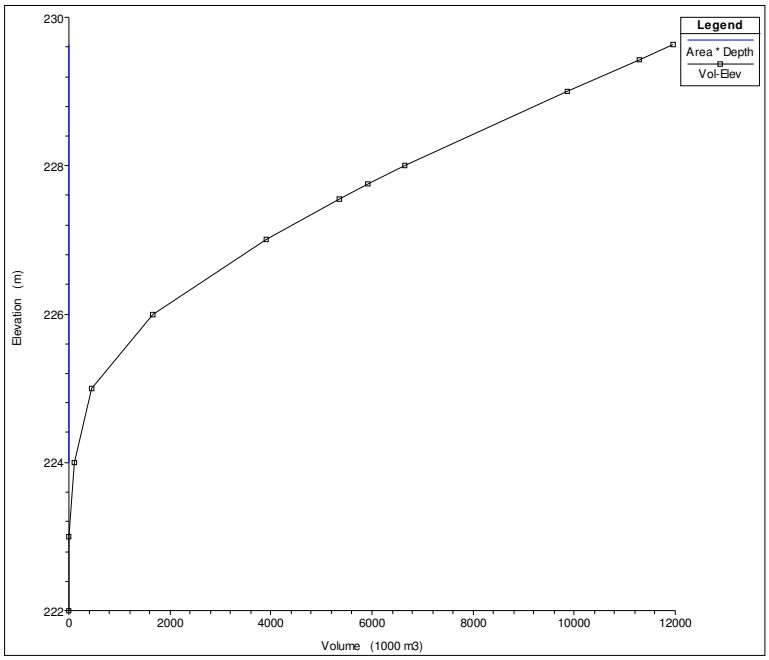
Szerokość jazu [m]	Rzędna korony jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
200	231.7	231.29	231.21	40	
200	231.5	231.23	231.16	65	
200	231.2	213.16	231.25	64	
250	231.35	213.19	231.25	50	
100	**231.35**	**213.23**	**231.18**	**52**	**Przyjęto do dalszych obliczeń**
350	231.35	231.18	231.25	55	



Rys. 13. Porównanie wpływu polderu w profilu Pustynia. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Babice.

- **Polder Łęg – Gromiec**

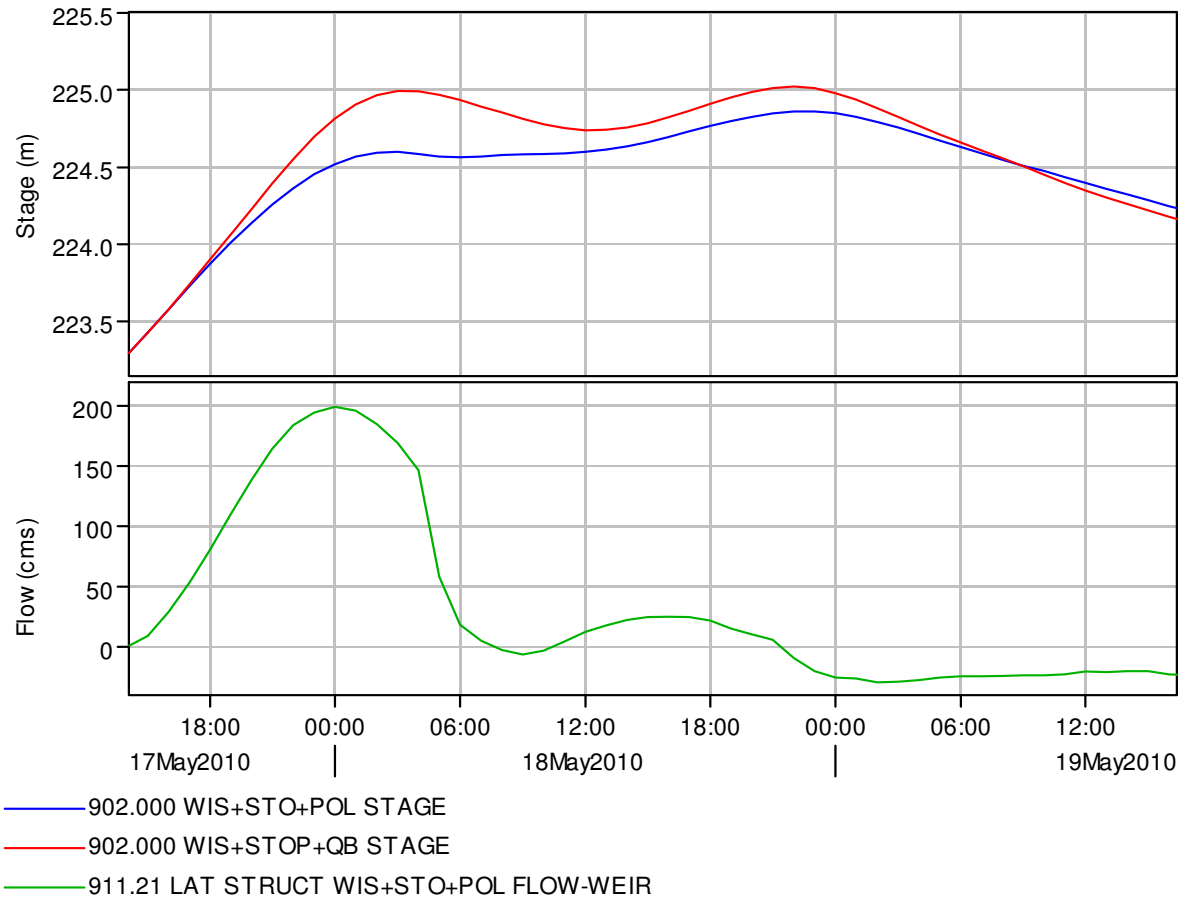
Kilometr wlotu: 911.21



Rys. 14. Krzywa napełnienia polderu Łęg-Gromiec.

Tab. 3. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Łęg w oparciu o profil Las.

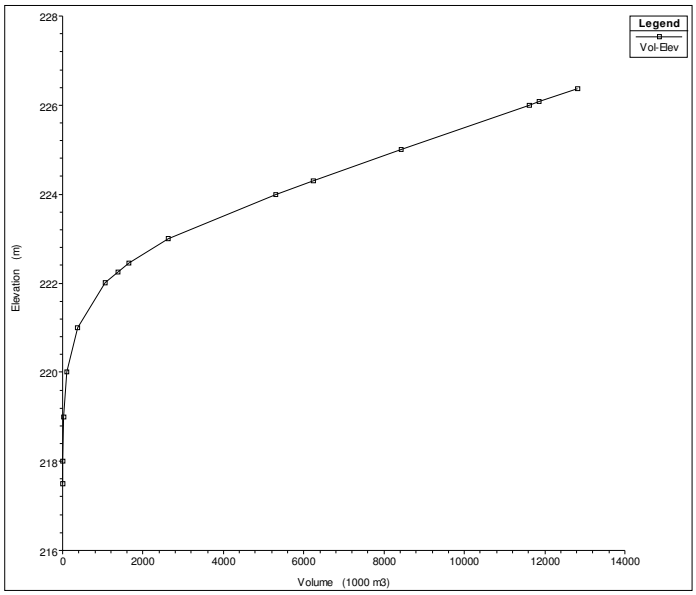
Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	**H max kulminacja pierwsza**	**H max kulminacja druga**	**Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]**	Uwagi
300	227.0	224.74	224.87	295	
300	227.5	224.60	224.86	200	Przyjęto do dalszych obliczeń
400	227.5	224.62	224.86	230	
200	226.5	224.80	224.87	260	



Rys. 15. Porównanie wpływu polderu w profilu Las. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Łęg.

- **Polder Mętków**

Kilometr wlotu: 901.5

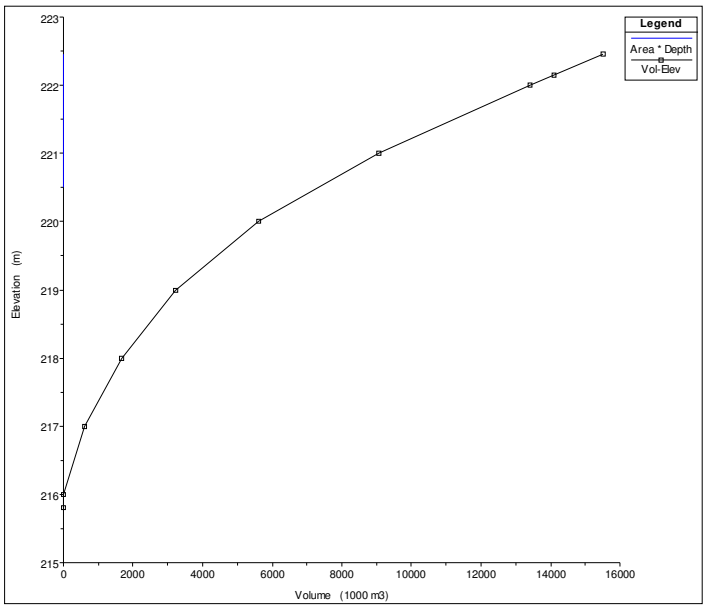


Rys. 16. Krzywa napełnienia polderu Mętków.

Przyjęto parametry wlotu: rzędna korony jazu wlotowego 222.3 szerokość 350 m.

- **Polder Rozkochów**

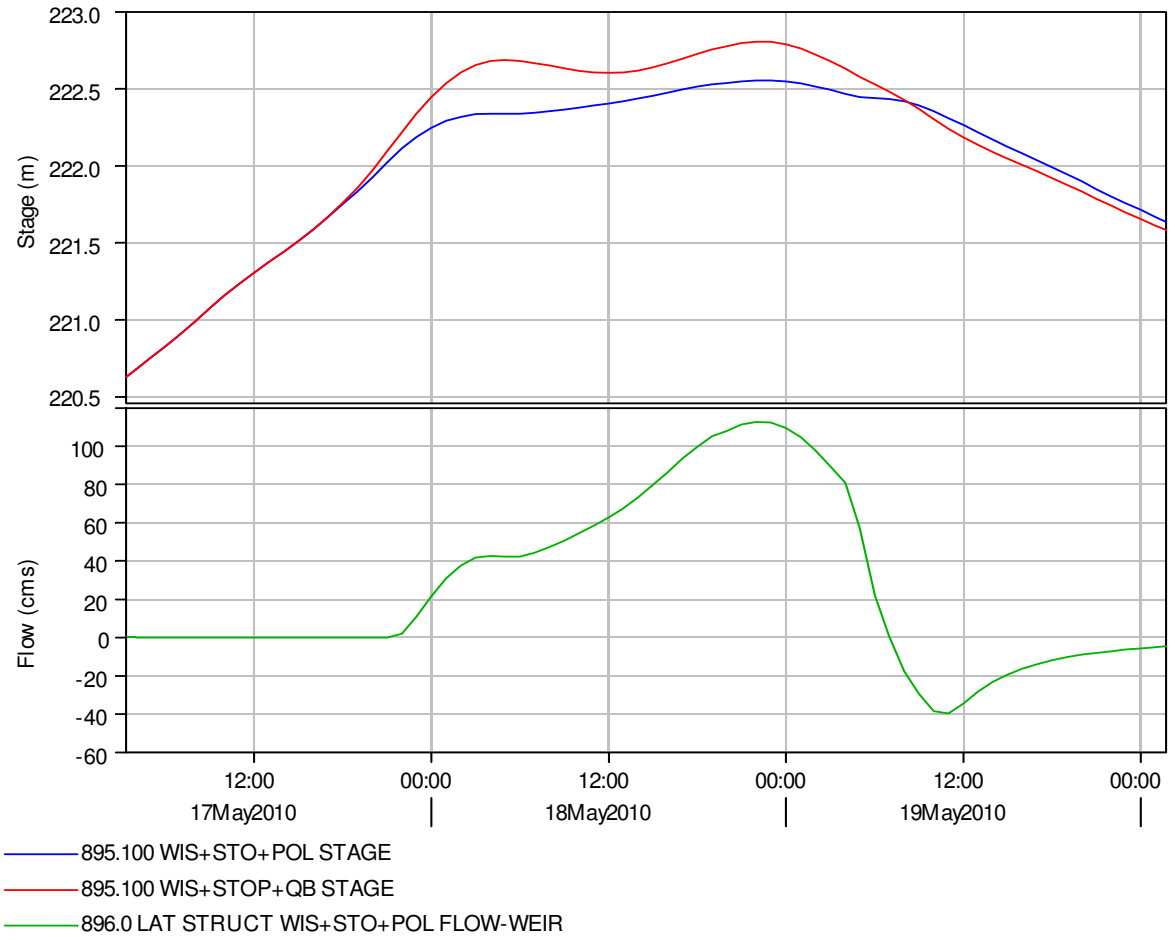
Kilometr wlotu: 896.0



Rys. 17. Krzywa napełnienia polderu Rozkochów.

Tab. 4. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Rozkochów w oparciu o profil Smolice.

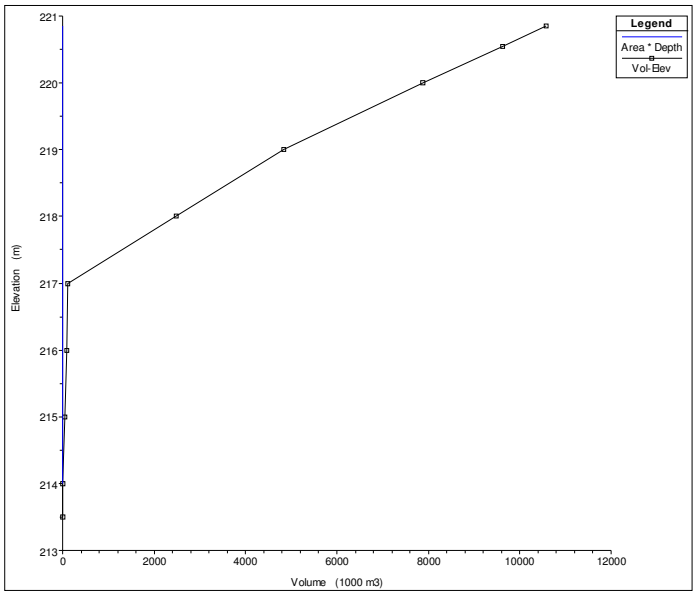
Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
100	222.0	222.33	222.60	83	
250	222.0	222.27	222.65	90	
250	222.3	222.35	222.58	94	
250	221.5	Brak	222.69	195	
350	222.3	222.34	222.55	112	Przyjęto do dalszych obliczeń



Rys. 18. Porównanie wpływu polderu w profilu Smolice. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Rozkochów.

- **Polder Wiślisko**

Kilometr wlotu 887.3

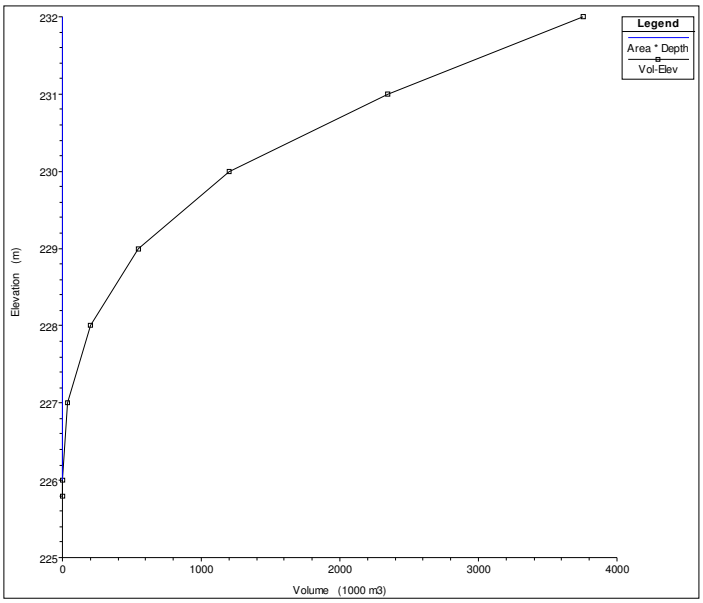


Rys. 19. Krzywa napełnienia polderu Wiślisko.

Przyjęto parametry wlotu: rzędna korony jazu wlotowego 219.0 szerokość 200 m.

- **Polder Zapasiecze**

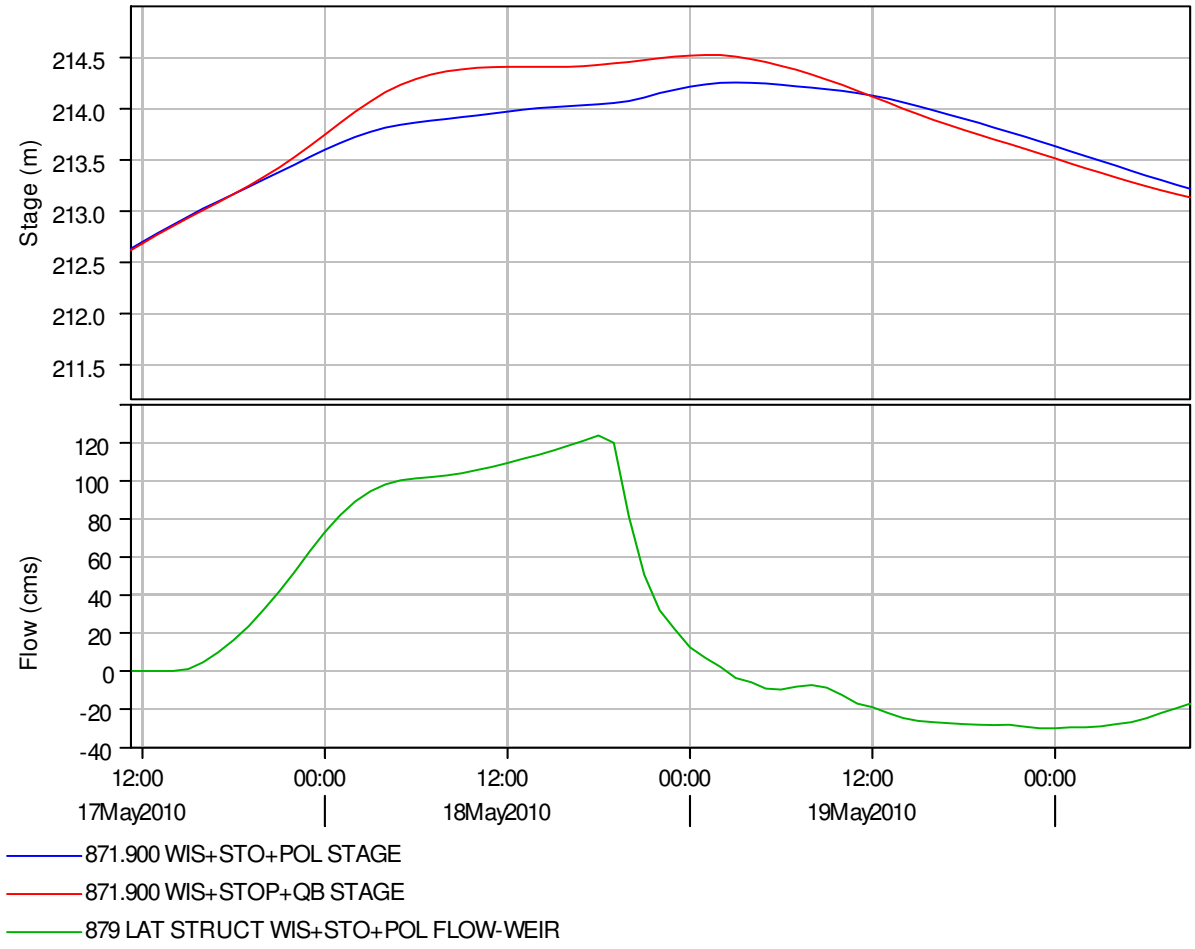
Kilometr wlotu: 874.69



Rys. 20. Krzywa napełnienia polderu Zapasiecze.

Tab. 5. Wyniki optymalizacji parametrów polderu w oparciu o profil Czernichów.

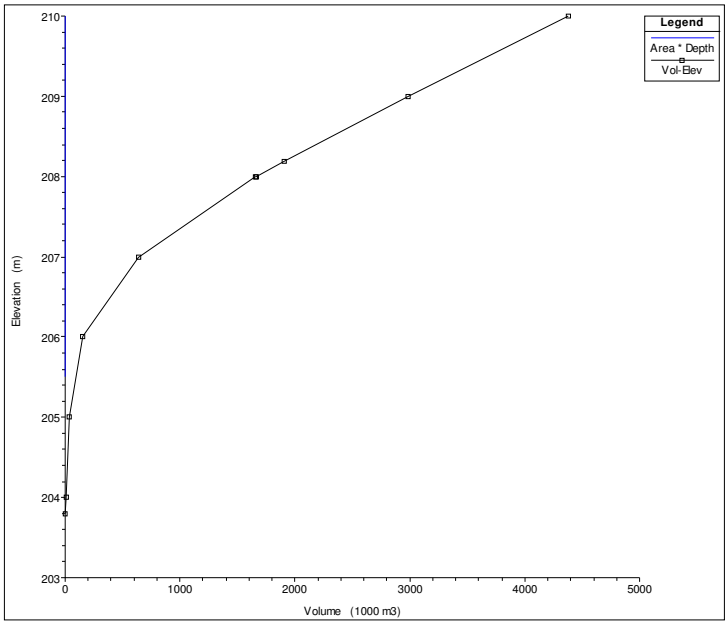
Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
100	216.0	Brak	214.25	123	Przyjęto do dalszych obliczeń
200	216.0	Brak	214.28	168	
100	215.5	Brak	214.28	166	
200	216.2	Brak	214.27	142	



Rys. 21. Porównanie wpływu polderu w profilu Czernichów. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Zapasiecze.

- **Polder Pasieka**

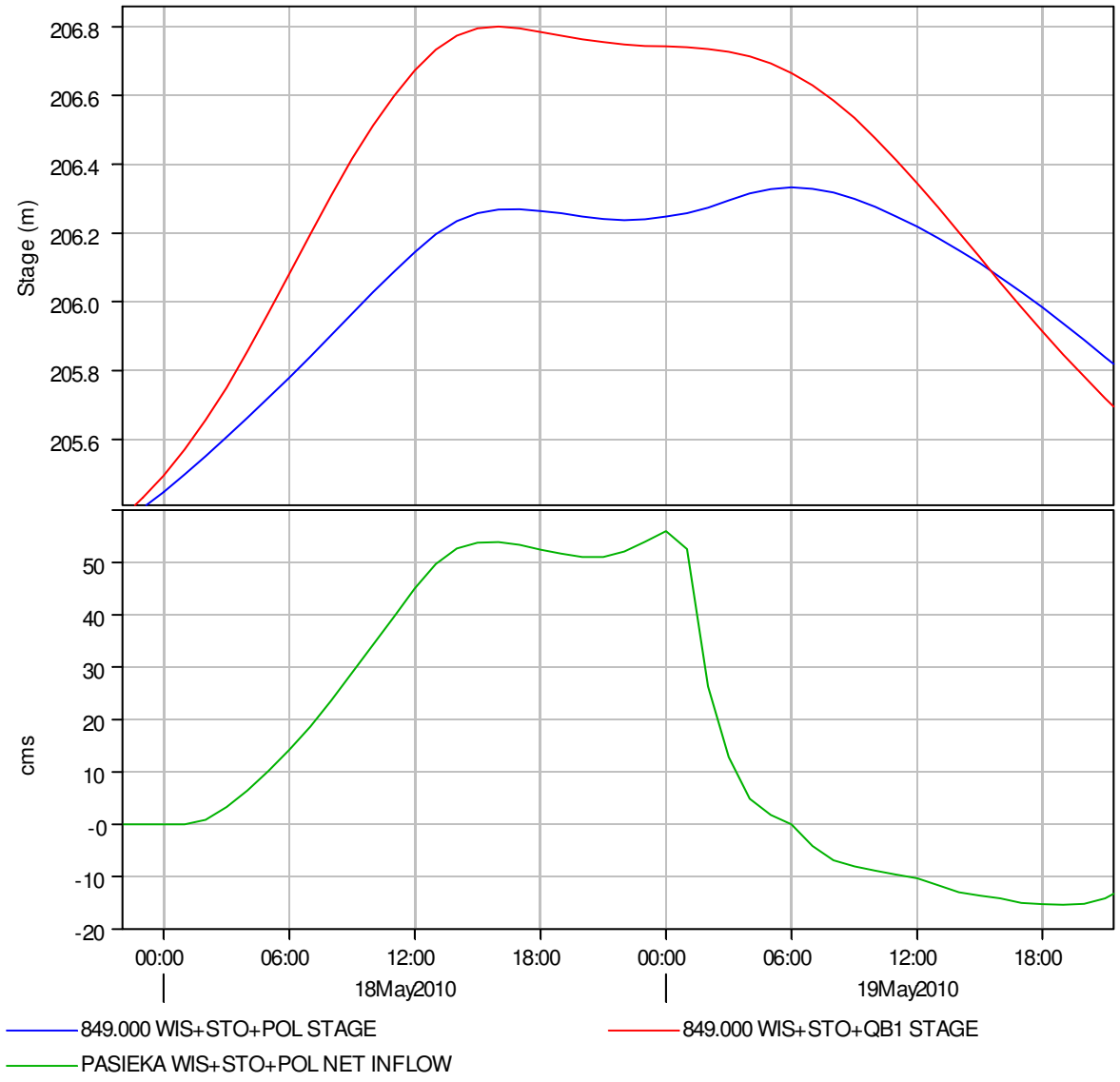
Kilometr wlotu: 858.700



Rys. 22. Krzywa napełnienia polderu Pasieka.

Tab. 6. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Pasieka w oparciu o profil Kraków Bielany.

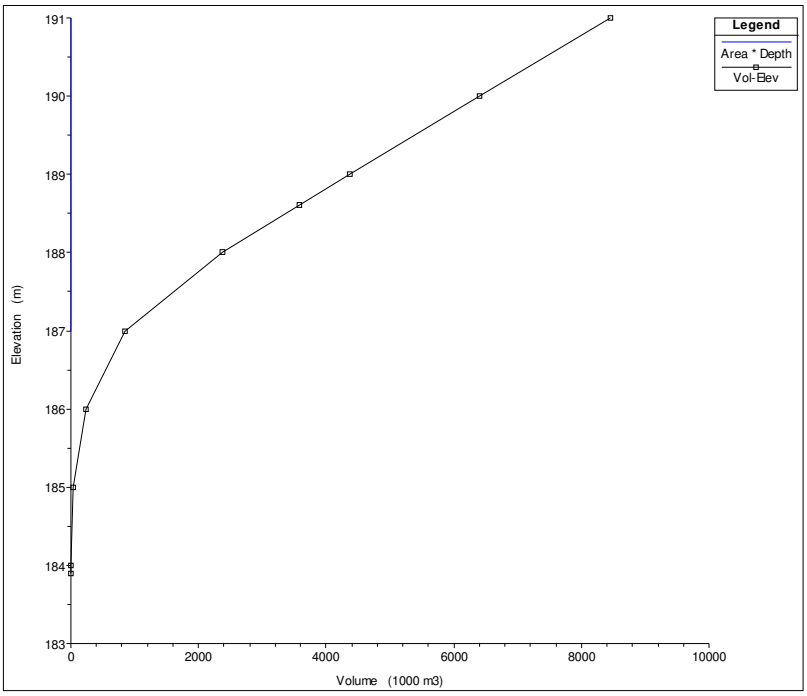
Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
100	208.5	206.23	206.36	75	
100	208.2	206.31	206.37	90	
200	208.5	206.30	206.37	110	
100	208.7	206.27	206.33	55	Przyjęto do dalszych obliczeń



Rys.23. Porównanie wpływu polderu w profilu Kraków-Bielany. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Pasieka.

- **Polder Wawrzeńczyce**

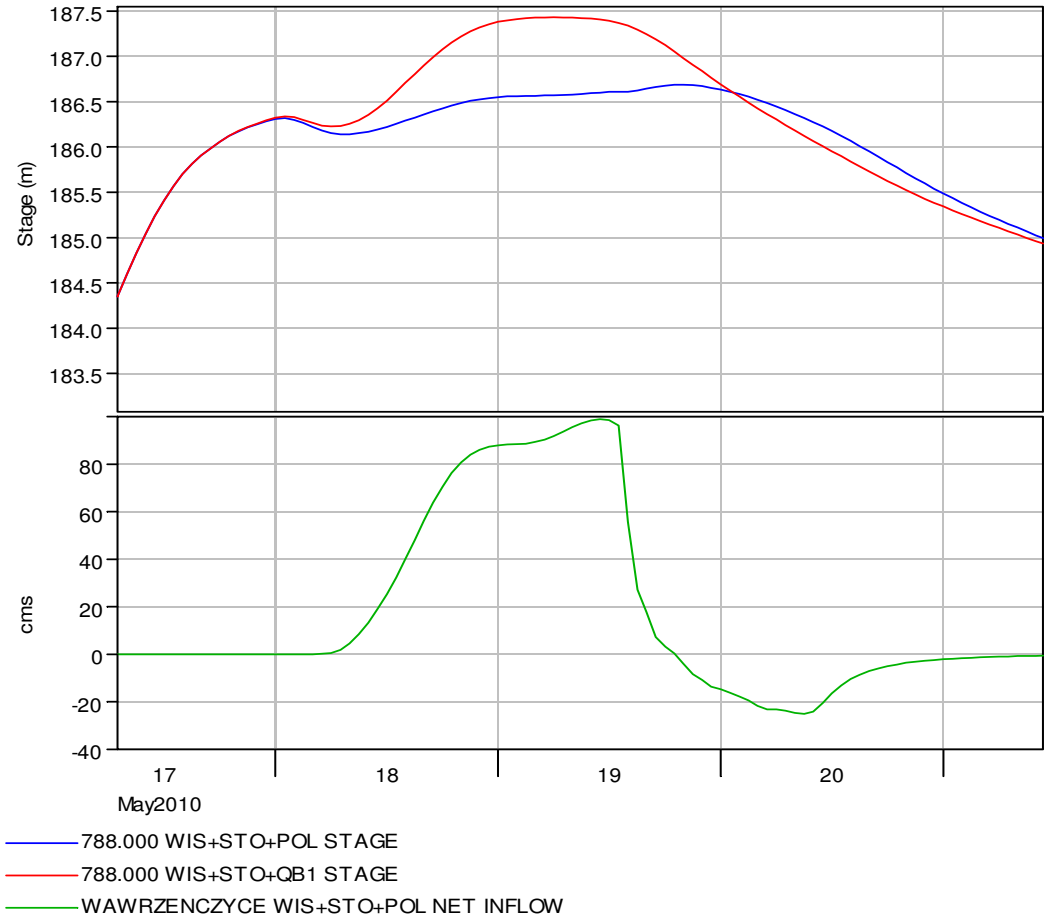
Kilometr wlotu: 803.78



Rys. 24. Krzywa napełnienia polderu Wawrzeńczyce.

Tab. 7. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Wawrzeńczyce w oparciu o profil Sierosławice.

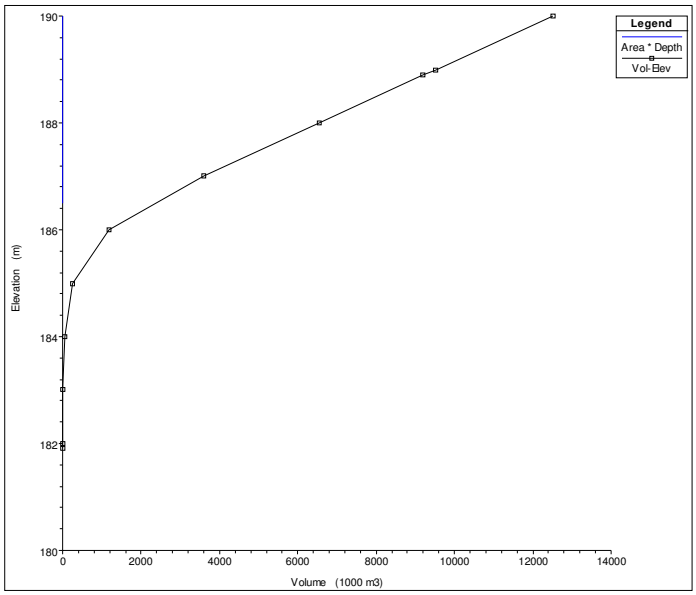
Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
100	190.5	186.32	186.70	68	
200	190.5	186.32	186.69	99	Przyjęto do dalszych obliczeń
200	190.3	186.32	186.72	144	
300	190.4	186.32	186.73	130	



Rys. 25. Porównanie wpływu polderu w profilu Sierosławice. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Wawrzeńczyce.

- **Polder Warsztaciska**

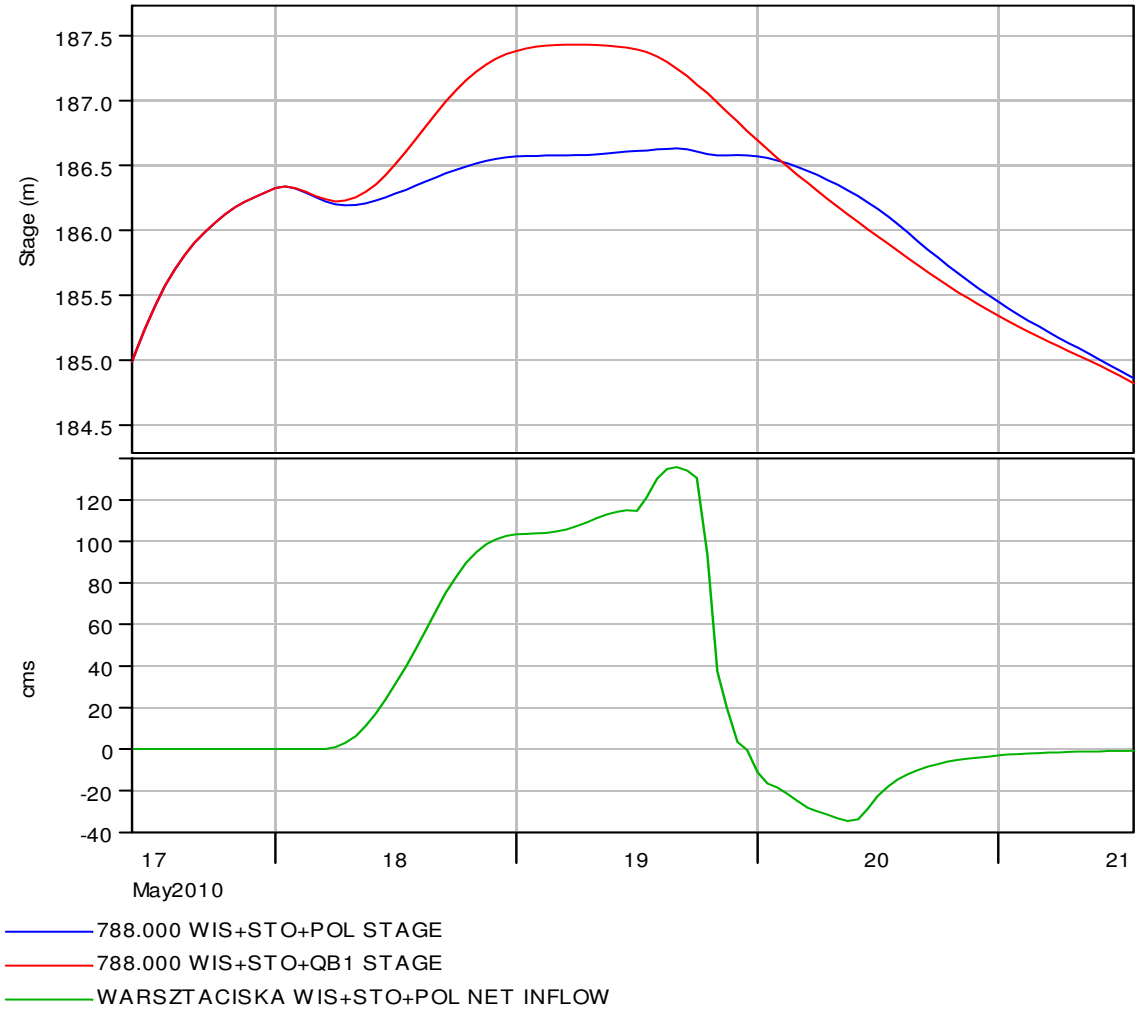
Kilometr wlotu: 801.8



Rys. 26. Krzywa napełnienia polderu Warsztaciska.

Tab. 8. Wyniki optymalizacji parametrów polderu Warsztaciska w oparciu o profil Sierosławice.

Szerokość jazu [m]	Rzędna jazu	H max kulminacja pierwsza	H max kulminacja druga	Maksymalny dopływ do polderu [m3/s]	Uwagi
100	189.5	186.32	186.69	117	
200	189.5	186.31	186.76	180	
200	189.8	186.32	186.67	130	
300	190	186.32	186.63	136	Przyjęto do oceny efektywności

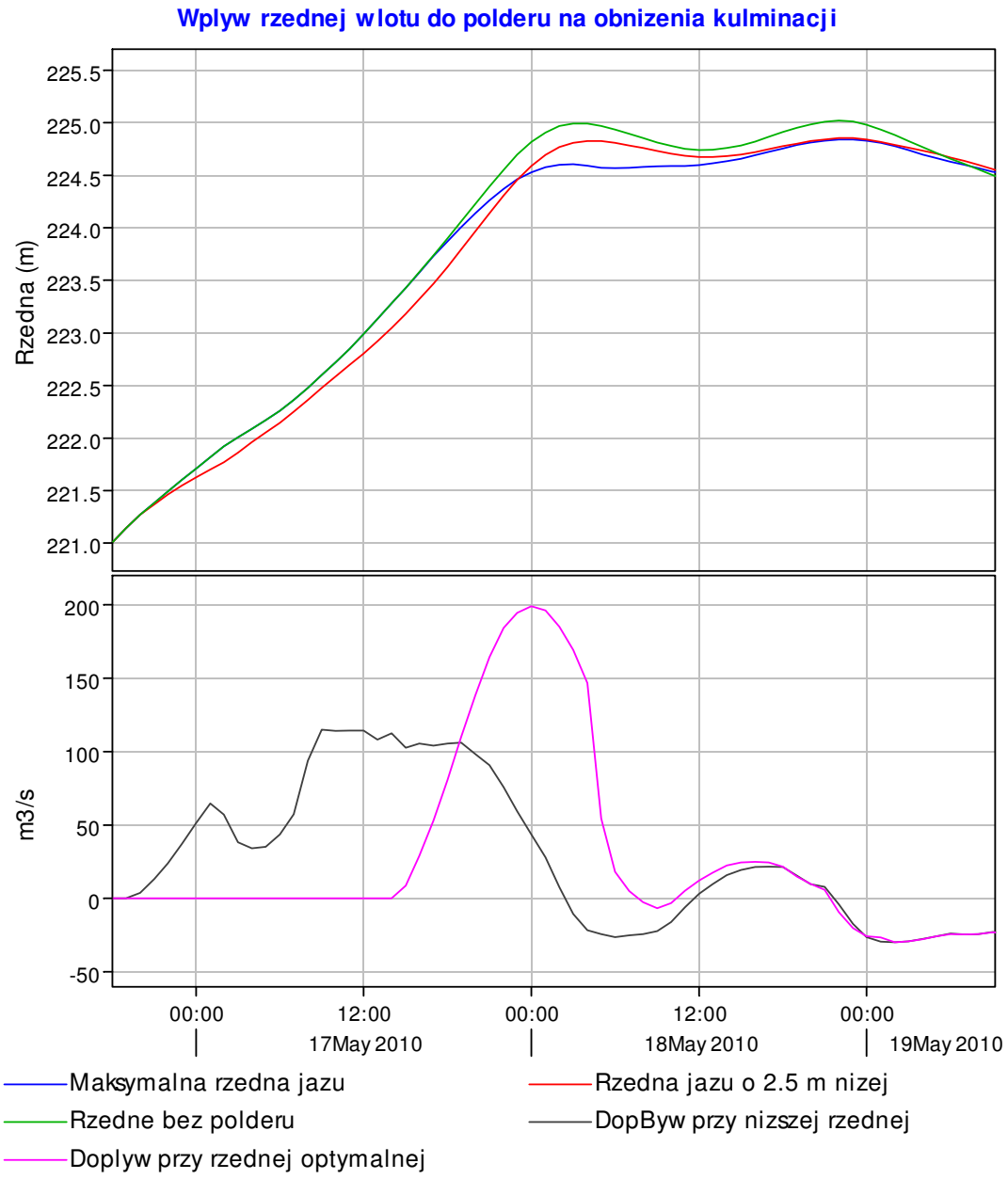


Rys. 27. Porównanie wpływu polderu w profilu Sierosławice. Linia niebieska wezbranie po przejściu przez polder, czerwona bez polderu. Na dole hydrogram dopływu do polderu Warsztaciska.

5. Podsumowanie wstępnej analizy

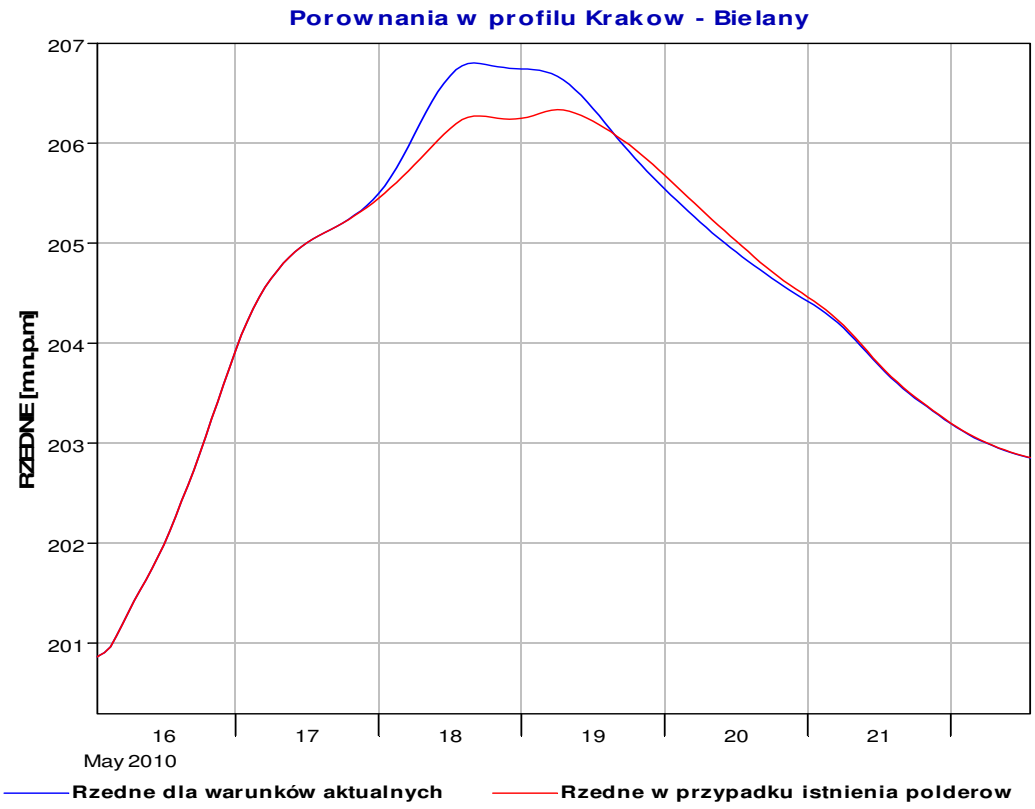
Jak wspomniano na początku rozdziału trzeciego parametry jazów wlotowych były dobrane tak, aby maksymalnie „zagospodarować" falę powodziową zaobserwowaną w maju roku 2010. Należy pamiętać, że w przypadku fali powodziowej o kulminacjach 30 lub więcej centymetrów mniejszych, efekt byłby minimalny lub nie byłoby go w ogóle.

Wynika to z maksymalizacji rzędnych jazów wlotowych tak by poldery nie zapełniły się przed kulminacją. W takim przypadku efekt działania byłby minimalny, bo przed kulminacją polder byłby wypełniony w całości. Przykład wpływu rzędnej jazu wlotowego na obniżenie kulminacji fali pokazuje poniższy rysunek.



Rys. 28. Wpływ rzędnej korony jazu wlotowego do polderu na wielkość obniżenia kulminacji na przykładzie polderu Gromiec.

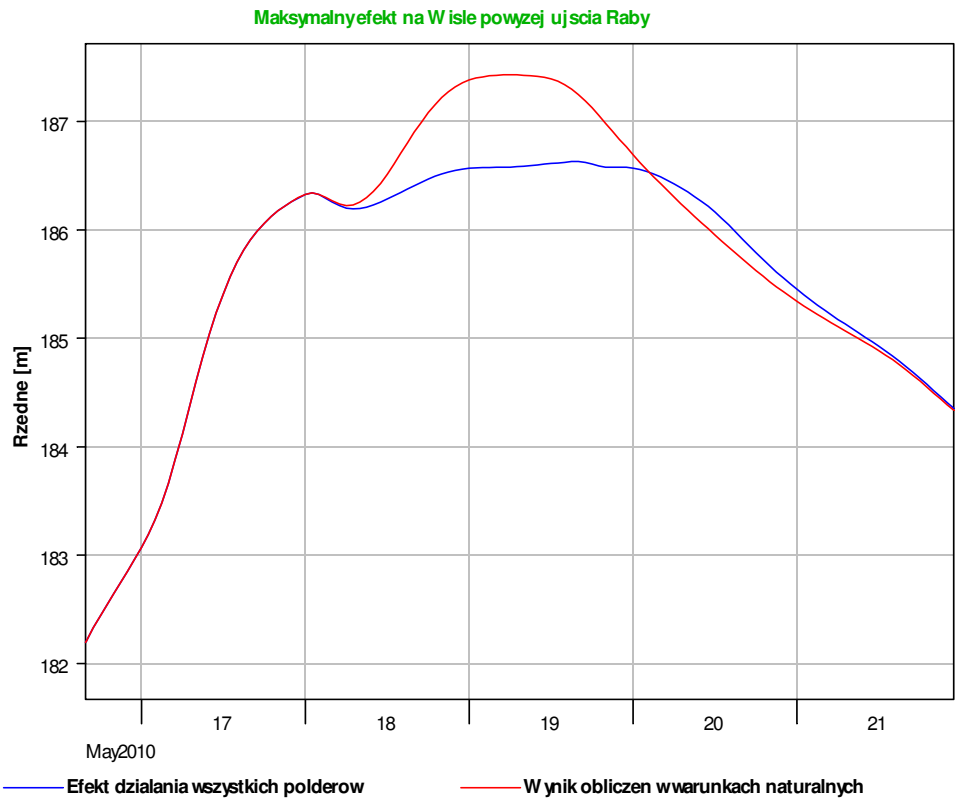
Efekt działania polderów dla odcinka Wisły powyżej Krakowa można podsumować rys. 29.



Rys. 29. Efekt działania polderów powyżej Krakowa.

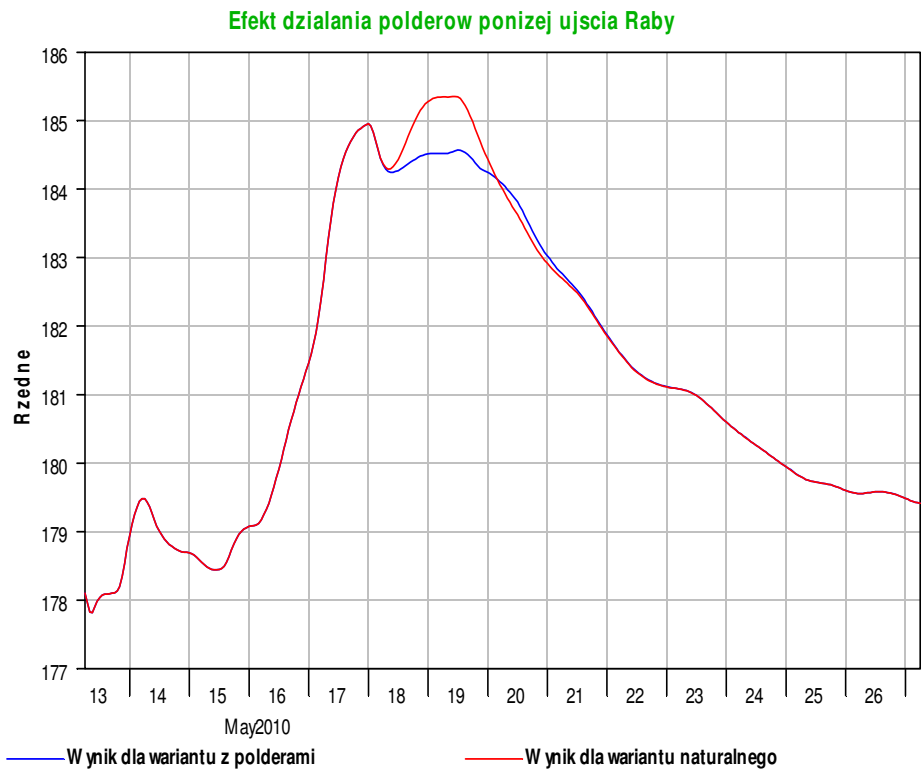
Z rysunku wynika, że działanie polderów powyżej Krakowa daje w efekcie obniżenie kulminacji o 47 cm w przypadku powodzi podobnej do tej z maja 2010.

Jeśli chodzi o efekt na Wiśle bezpośrednio powyżej ujścia Raby to jest on pokazany na rys. 30. Całkowita różnica w kulminacji wyniosła 80 cm.



Rys. 30. Wynik działania wszystkich polderów na Wiśle powyżej ujścia Raby.

Wpływ polderów na przepływ kulminacyjny poniżej Raby był uzależniony od sytuacji na Rabie, z której pochodzi pierwsza kulminacja jak to pokazana na rysunku rys. 31. Efekt wpływu Raby na kulminację Wisły jest tu nieco wyolbrzymiony w stosunku do rzeczywistości, ale wynika on z zalania części ujściowego odcinka na Rabie oraz braku wiarygodnych wyników obserwacji.



Rys. 31. Efekt działania polderów na Wiśle poniżej ujścia Raby (profil Popendzynka).

6. Obliczenia właściwe i ich wyniki

Ostatecznie obliczenia były prowadzone nie dla 7 ale dla wszystkich 9 polderów:

- Babice,
- Łęg – Gromiec,
- Mętków,
- Rozkochów,
- Wiślisko,
- Zapasiecze – Czernichów,
- Pasieka,
- Warsztaciska,
- Wawrzeńczyce.

Druga seria obliczeń bazowała na tych samych danych hydrologicznych co pierwsza. Jednak z uwagi na obliczenia dodatkowego wariantu zmieniła się nieco geometria koryta.

Dotyczy to rejonu polderów Babice, Wiślisko i Warsztaciska. Nie pozostało to bez wpływu na obliczenia podstawowe (czyli bez polderów) i z tego też względu i one zostały powtórzone. Przyczyną nieco innych wyników wariantu podstawowego był fakt, że przekroje poprzeczne pochodziły z dwóch różnych źródeł co miało pewien wpływ na stabilnośc i warunki obliczeń. Należy jednak podkreślić, że ostateczne porównania bazowały na identycznych warunkach geometrii koryta i hydrologii.

Dodatkowy wariant przewidywał relokacje obwałowań w okolicach wyżej wspomnianych trzech polderów tak by działały one jako „poldery przepływowe" czyli bez retencji spowodowanej położeniem wlotu do polderu stosunkowo wysoko względem kulminacji fali i „oddających" wodę w bliżej nieokreślonym terminie po zakończeniu powodzi. Analizowane warianty przedstawiono w poniższej tabeli.

Tab. 9. Warianty poddane badaniom symulacyjnym.

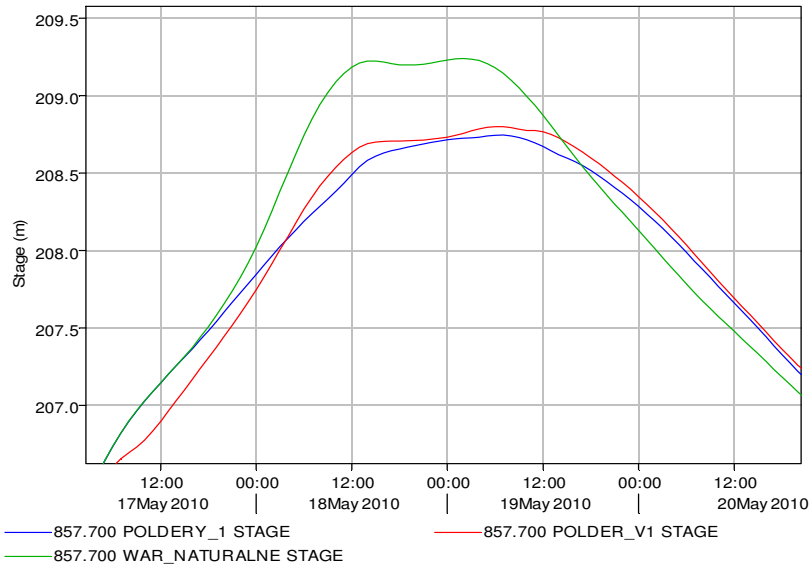
Wariant I oparty wyłącznie o poldery	Wariant II mieszany: 6 polderów wraz relokacją obwałowań
polder Babice - kilometr wlotu: 921.1	relokacja obwałowań km 921.6 – 919.65
polder Łęg – Gromiec kilometr wlotu: 911.21	polder Łęg – Gromiec kilometr wlotu: 911.21
polder Mętków kilometr wlotu: 901.50	polder Mętków - kilometr wlotu: 901.50
polder Rozkochów - kilometr wlotu: 896.00	polder Rozkochów - kilometr wlotu: 896.00
polder Wiślisko - kilometr wlotu 887.30	relokacja obałowań km 886.8 – 885.00
polder Zapasiecze - kilometr wlotu: 874.69	polder Zapasiecze - kilometr wlotu: 874.69
polder Pasieka - kilometr wlotu: 858.70	polder Pasieka - kilometr wlotu: 858.70
polder Wawrzeńczyce - kilometr wlotu 803.78	polder Wawrzeńczyce - kilometr wlotu 803.78
polder Warsztaciska - kilometr wlotu: 801.80	relokacja obwałowań km 801.2 – 803.3

Ponieważ w przypadku niektórych polderów maksymalne rzędne napełnienia przekraczały maksymalne rzędne obwałowań konieczna była zmiana lokalizacji wlotów do polderów. Dotyczyło to głównie polderu Zapasiecze - Czernichów. Zmniejszyło to co prawda nieco efekt działania poderów, ale zapewniło większą zgodność z warunkami ich lokalizacji. Maksymalne napełnienie tego polderu wyniosło przy warunkach „mieszanych" polderów 214.85.

W dalszej części dla wybranych profili dokonano porównania rzędnych (stage) oraz przepływów (flow) po zmianie wlotu do polderu Czernichów – Zapasiecze. Pokazane hydrogramy można odnieść do konkretnego kilometrażu Wisły wg MPHP (Mapy Podziału Hydrologicznego Polski). W przybliżeniu odejmując od tego kilometrażu wartość 918.0 otrzymamy wykorzystywany, na co dzień kilometraż rzeki Wisły.

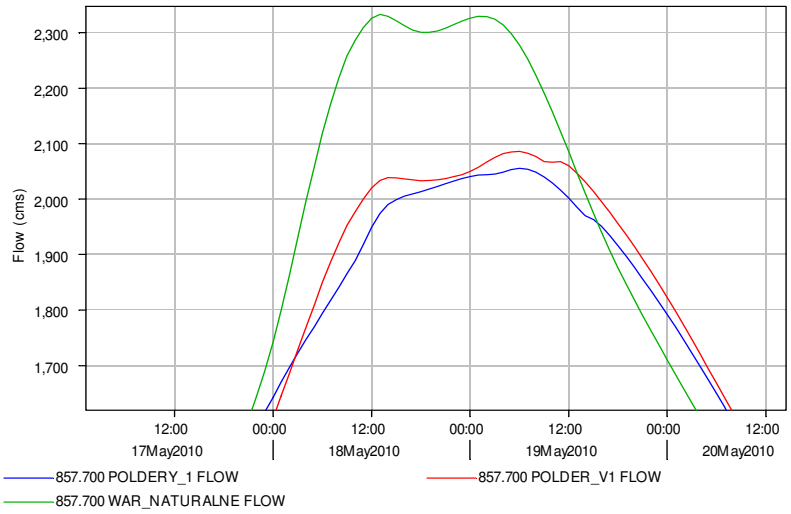
Kolor zielony warunki naturalne, **kolor niebieski** wszystkie poldery a **kolor czerwony** wariant z relokacją obwałowań.

Na rys. 32 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu poniżej ujścia Skawinki tj. w km 857+700. Swtierdzono, że redukcja dla wariantu z 9 polderami wyniesie 49 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwałowań będzie nieco niższa i wyniesie 44 cm.



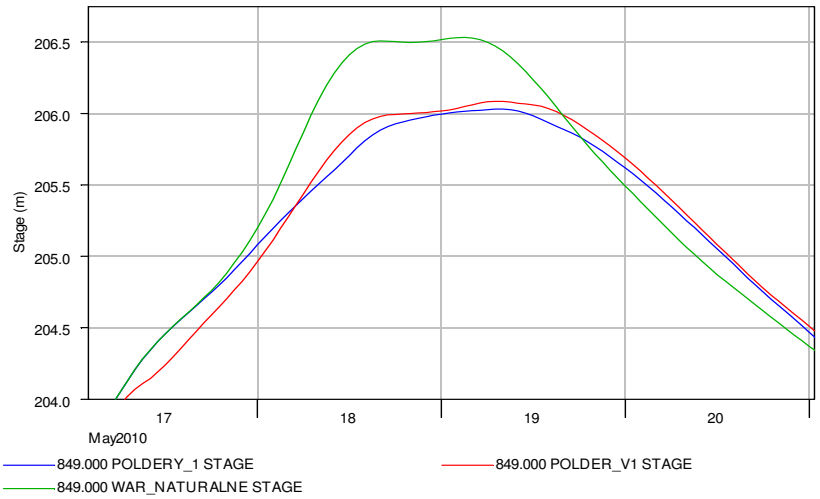
Rys. 32. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły poniżej ujścia Skawinki.

Z kolei na rys. 33 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu poniżej ujścia Skawinki w. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 278 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 247 m^3/s.



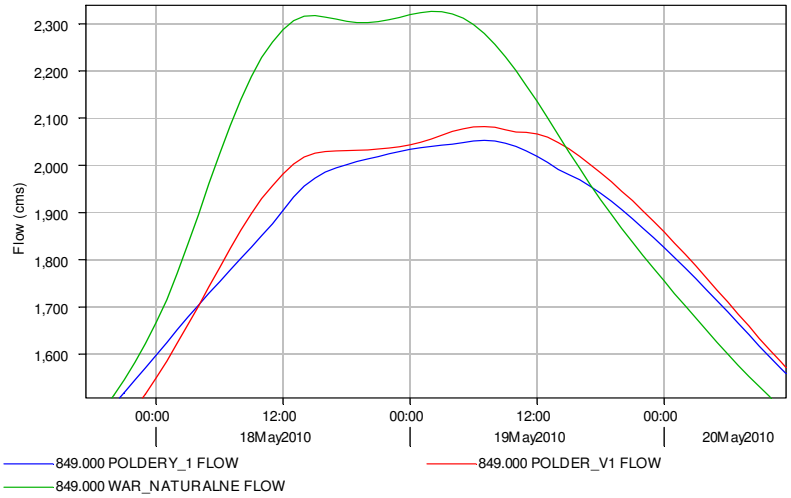
Rys. 33. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu wody Wisły poniżej ujścia Skawinki.

Na rys. 34 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu w rejonie Bielan tj. w km 849+000. Stwierdzono, że redukcja dla wariantu z 9 polderami wyniesie 50 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwalowań będzie nieco niższa i wyniesie 44 cm.



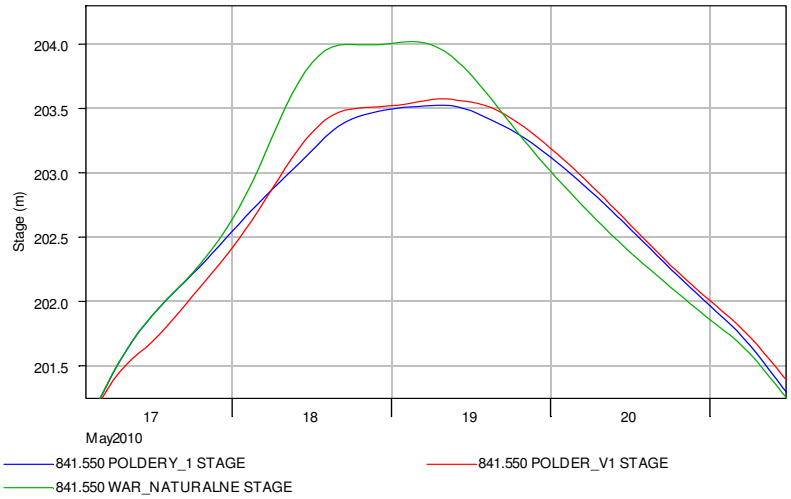
Rys. 34. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły w rejonie wodowskazu Kraków- Bielany.

Z kolei na rys. 35 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu w profilu w rejonie Bielan tj. w km 849+000. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 274 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 244 m^3/s.



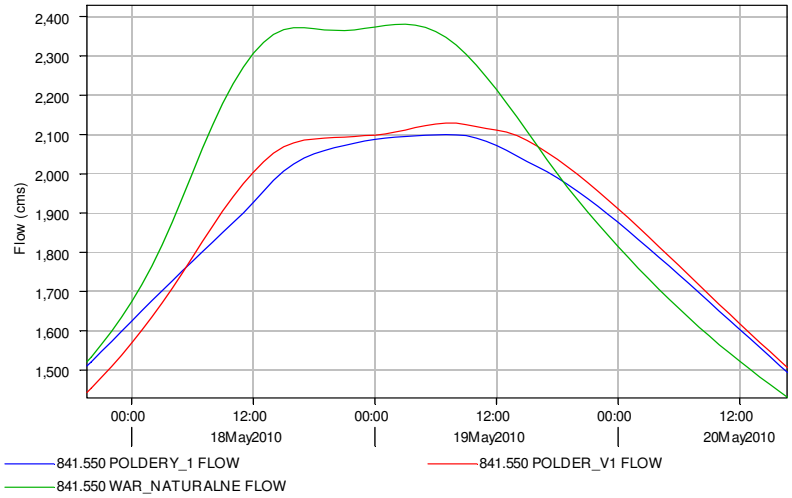
Rys. 35. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu Wisły w rejonie wodowskazu Kraków-Bielany.

Na rys. 36 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu w rejonie Wawelu tj. w km 841+550. Stwierdzono, że redukcja dla wariantu z 9 polderami wyniesie 50 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwałowań będzie nieco niższa i wyniesie 44 cm.



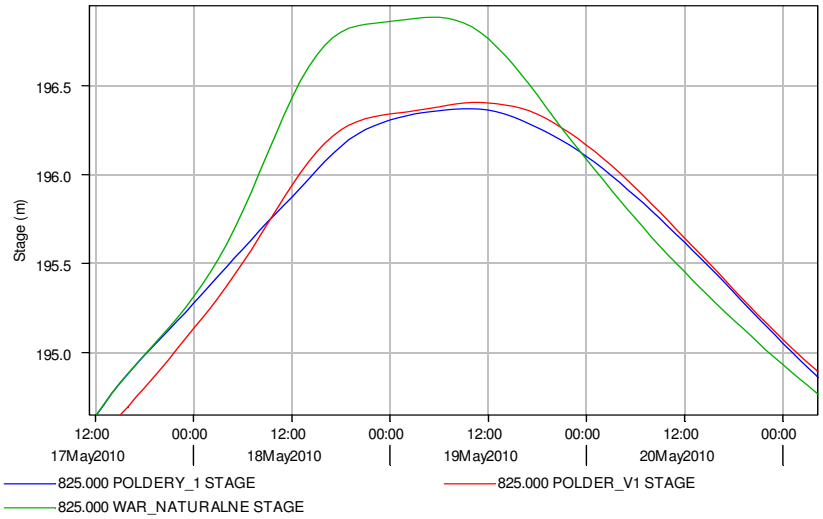
Rys. 36. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły w rejonie w rejonie Wawelu.

Z kolei na rys. 37 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu w profilu w rejonie Wawelu tj. w km 841+550. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 280 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 251 m^3/s.



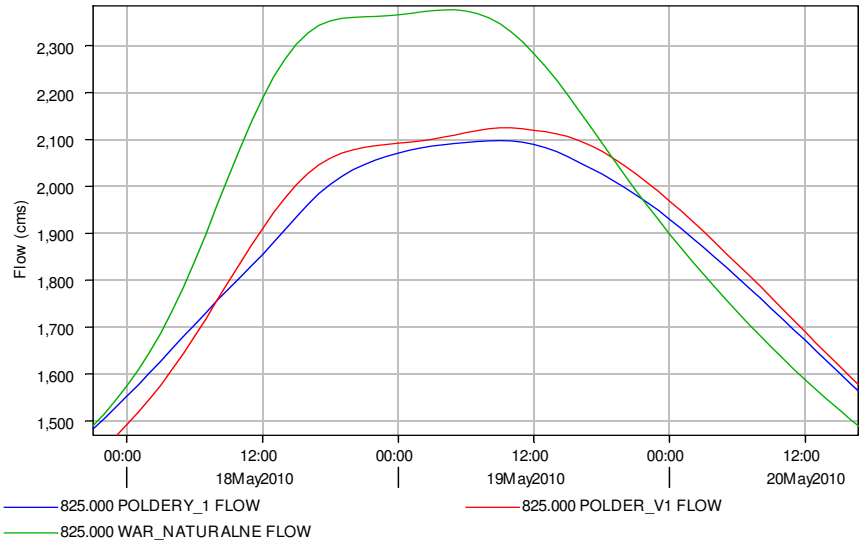
Rys. 37. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu Wisły w rejonie Wawelu.

Na rys. 38 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu w poniżej Krakowa tj. w km 825+000. Stwierdzono, że redukcja dla wariantu z 9 polderami wyniesie 52 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwałowań będzie nieco niższa i wyniesie 48 cm.



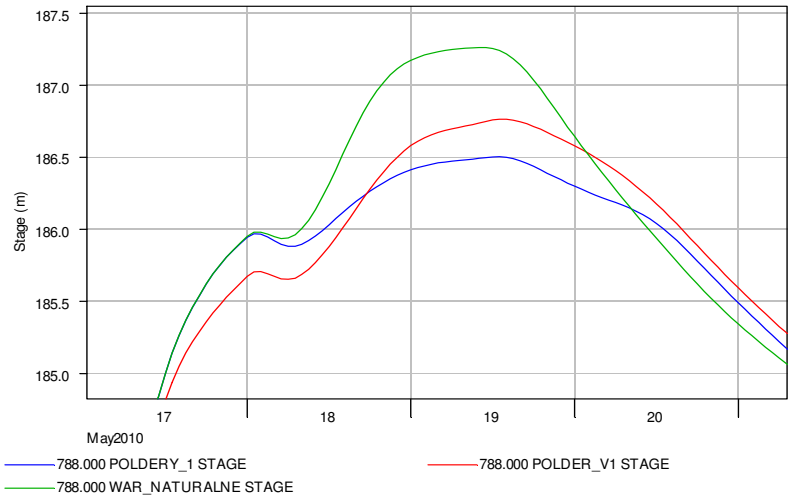
Rys. 38. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły poniżej Krakowa.

Z kolei na rys. 39 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu w profilu poniżej Krakowa tj. w km 825+000. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 279 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 252 m^3/s.



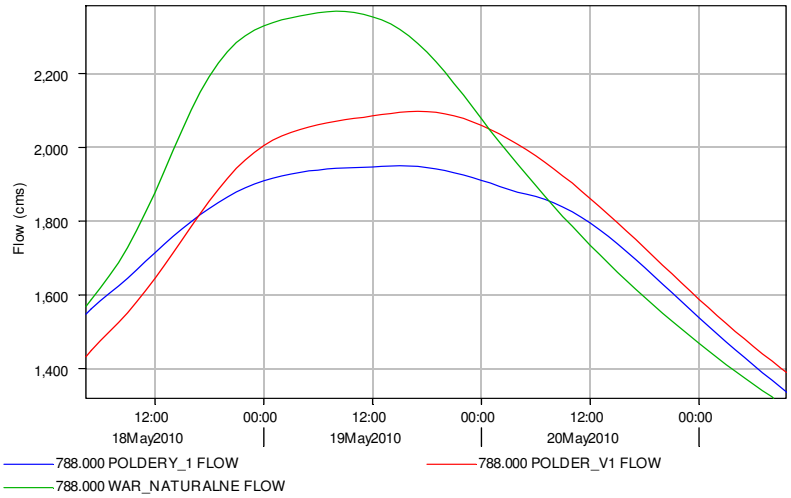
Rys. 39. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu Wisły poniżej Krakowa.

Na rys. 40 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu w rejonie Sierosławic tj. w km 788+000. Stwierdzono, że redukcja dla wariantu z polderami wyniesie 76 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwałowań będzie niższa i wyniesie 50 cm.



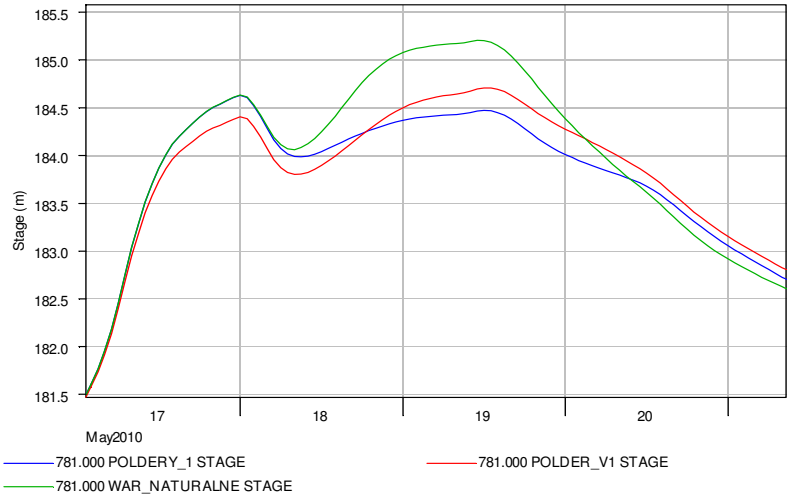
Rys. 40. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły w rejonie wodowskazu Sierosławice (powyżej ujścia Raby).

Z kolei na rys. 41 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu w profilu w rejonie Sierosławic tj. w km 788+000. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 420 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 271 m^3/s.



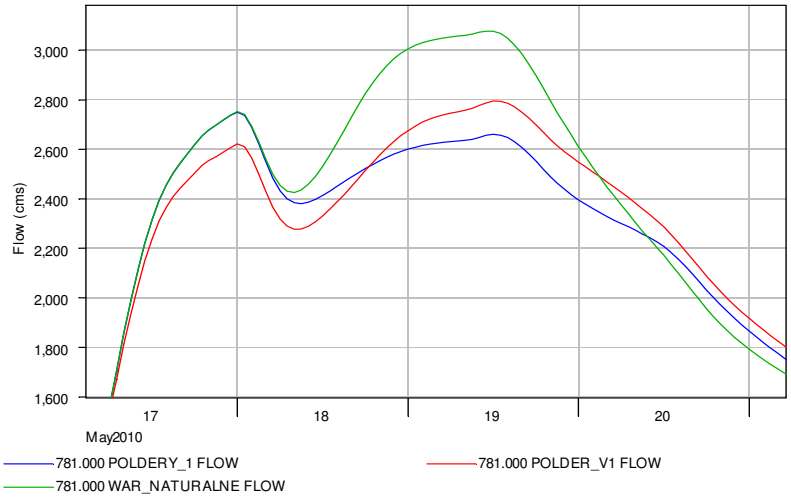
Rys. 41. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu w rejonie wodowskazu Sierosławice (powyżej ujścia Raby).

Na rys. 42 przedstawiono wyniki redukacji maksymalnych rzędnych zwierciada wody w profilu poniżej Raby tj. w km 781+000. Stwierdzono, że redukcja dla wariantu z polderami wyniesie 57 cm, natomiast dla wariantu z częściową relokacją obwałowań będzie niższa i wyniesie 49 cm.



Rys. 42. Porównanie wartości maksymalnych rzędnych zwierciada wody Wisły poniżej Raby.

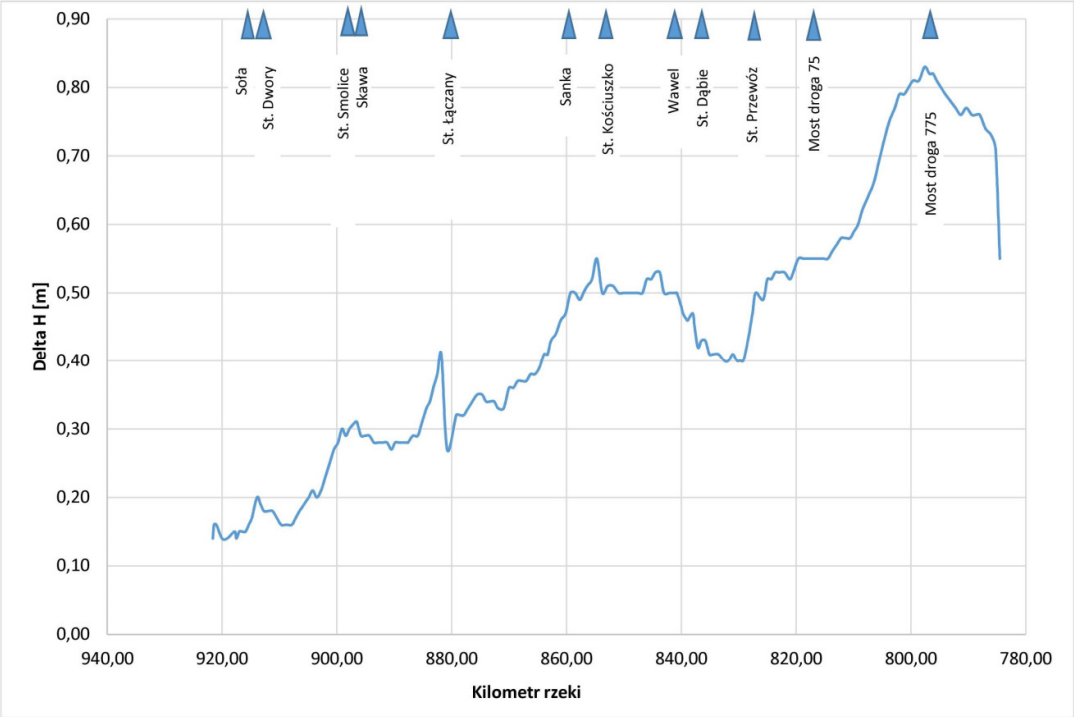
Z kolei na rys. 43 pokazano zmiany w profilu maksymalnych natężeń przepływu w profilu poniżej Raby tj. w km 781+000. Wskutek realizacji pełnej polderyzacji nastąpi zmniejszenie wartości przepływów o 330 m^3/s. Z kolei wariant z częściową relokacją obwałowań pozwoli na zmniejszenie wartości przepływów o 290 m^3/s.



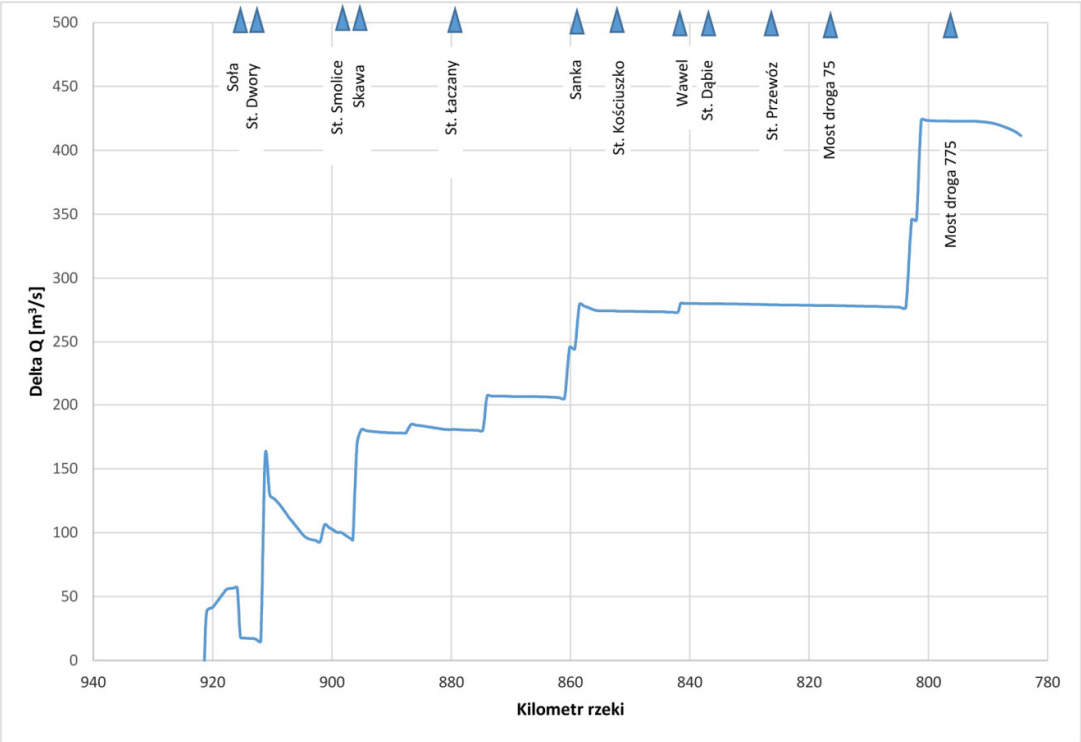
Rys. 43. Porównanie wartości maksymalnych natężeń przepływu Wisły poniżej Raby.

Innym sposobem prezentacji efektu działania polderów lub częściowej polderyzacji połączonej z relokacją obwałowań jest prezentacja porównań w profilu podłużnym. Jednak możliwa ona jest tylko na krótkich odcinkach z uwagi na spadek zwierciadła wody. Na potrzeby niniejszego opracowania na przedstawiono efektywność działania wszystkich 9 analizowanych polderów.

Działanie polderów pozwoliłoby na redukcję rzędnych zwierciadła Wisły od 14 cm w rejonie ujścia Soły do Wisły do 80 cm w okolicach mostu wiślanego drogi 775 prowadzącej w kierunku Nowego Brzeska (rys. 44). W rejonie Wawelu w Krakowie obniżenie fali powodziowej wyniesie 50 cm, po czym pomiędzy stopniami Dąbie i Przewóz wartość ta ulega zmniejszeniu o 10 cm. W odniesieniu do maksymalnych natężeń przepływu wariant z pełną polderyzacją umożliwiłby jednocześnie ich redukcję max do 423 m^3/s (rys. 45). W przypadku budowy polderów z urządzeniami sterującymi efektywność może być większa.



Rys. 44. Możliwe obniżenie maksymalnych rzędnych zwierciadła wody dla powodzi z 2010 r. na Wiśle uzyskane w wyniku budowy pełnej polderyzacji rzeki.



Rys. 45. Możliwe obniżenie maksymalnych natężeń przepływu dla powodzi z 2010 r. na Wisłę wskutek pełnej polderyzacji rzeki.

7. Wykorzystanie polderów w modelu

Wykorzystany w obliczeniach pakiet HEC-RAS modeluje poldery, jako urządzenie wlotowe (przelew boczny) o określonej długości i rzędnej przelewu (te wartości były optymalizowane w pierwszej części opracowania) oraz krzywej napełnienia polderu a więc relacji pomiędzy napełnieniem polderu a jego pojemnością. Gdyby w trakcie obliczeń zdarzyły się przypadki, że obliczona rzędna byłaby wyższa od rzędnej maksymalnej opisującej pojemność polderu, aplikacja ekstrapoluje krzywą pojemności o odpowiednią wartość na podstawie ostatnich dwóch punktów krzywej. Obliczone maksymalne rzędne w polderach zestawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Obliczone maksymalne rzędne w polderach.

POLDER	Max rzędna krzywej napełnienia	Max rzędna według obliczeń	Max rzędna w korycie w pobliżu wlotu
Babice	232.00	231.85	231.85
Łęg - Gromiec	229.63	228.38	228.37
Mętków	226.38	224.73	224.74
Rozkochów	222.45	222.07	222.06
Wiślisko	220.85	220.28	220.28
Zapasiecze - Czernichów	215.00	214.84	214.85
Pasieka	210.00	209.20	209.20
Warsztaciska	190.00	188.96	188.95
Wawrzeńczyce	191.00	190.75	190.75

8. Oszacowanie wpływu polderów na maksymalne rzędne poniżej ujścia Dunajca

Przygotowany model kończył się kilka kilometrów poniżej ujścia Raby a więc jego wykorzystanie do obliczeń wpływu polderów na dalszy odcinek Wisły nie było możliwe bezpośrednio. Prowadząc rozumowanie w oparciu o oszacowania wpływu obniżenia kulminacji poniżej ujścia Raby prawie o 500 m3/s (rys. 41) oznaczałoby to maksymalnie takie obniżenie kulminacji Wisły w Karsach (poniżej ujścia Dunajca). Kulminacja ta wynosiła nieco ponad 5000 m3/s a więc, nie dywagując nad wpływem Dunajca na kulminację w Karsach, można przyjąć, że maksymalne możliwe obniżenie dawałoby kulminację około 4650 m3/s w czasie powodzi w maju 2010 r. Biorąc pod uwagę obowiązującą krzywą natężenia przepływów dałoby to różnicę w rzędnych maksymalnie 30 cm.

9. Możliwe do wykonania pozostałe działania rewitalizacyjne w małopolskiej dolinie górnej Wisły mające wpływ na wielkość rzędnych fali powodziowej nie objęte modelowaniem

Na wysokości stopnia Przewóz sugeruje się przyłączenie do głównego koryta Wisły prawobrzeżnego starorzecza (50°02'13.63"N, 20°05'36.78"E) o długości 1,8 km, tak żeby było zalewane przynajmniej dwa do trzech razy w ciągu roku. Ponadto proponuje się zaniechanie dalszych prac regulacyjnych i konserwacji zbędnych budowli regulacyjnych, a w niektórych przypadkach ich demontaż. Postulaty te nie dotyczą obiektów chroniących wały oraz inne elementy infrastruktury. Demontaż budowli regulacyjnych powinien dotyczyć w pierwszej kolejności ostróg wykonanych na brzegach wypukłych wzdłuż całego małopolskiego odcinka Wisły poniżej stopnia Przewóz. Na dwóch jednostronnie obwałowanych odcinkach rzeki Wisły tj. w okolicach Wawrzeńczyc km 805+250 – 802+500 (kilometraż wg MPHP) oraz pomiędzy Nowym Brzeskiem a Koszycami km 798+800 – 785+000 postuluje się wytypowanie miejsc zbudowanych ze żwiru lub piasku, gdzie możliwe byłoby również usunięcie umocnień wykonanych na brzegach wklęsłych lewostronnej części Wisły. Pozwoliłoby to na uruchomienie procesu podcinania skarp brzegów i co za tym idzie zwiększenie dostawy rumoszu do koryta rzeki oraz ograniczenie erozji dennej. Ponadto sugeruje się rozważyć likwidację lewobrzeżnego obwałowania w km 786+200 – 785+650 w miejscowości Parcela – Morsko o długości ok. 450 m. Obwałowanie to nie spełnia swojej funkcji, gdyż zgodnie z mapami zagrożenia powodziowego (http://mapy.isok.gov.pl/imap/) nie jest w stanie zatrzymać nawet wody o prawdopodobieństwie przepływu 10%. Ponadto jest zlokalizowane na wysokości pól uprawnych. W przypadku jego ew. uszczelnienia i podwyższenia wartość chronionych terenów byłaby niższa od kosztów poniesionych na realizację tego typu przedsięwzięcia.

10. Podsumowanie

Uzyskane wyniki redukcji maksymalnych rzędnych oraz przepływów fali powodziowej wskazują, iż z punktu widzenia efektywności powodziowej korzystniejsze jest utworzenie 9 polderów (wariant I). Z kolei biorąc pod uwagę względy środowiskowe lepszym rozwiązaniem jest częściowa polderyzacja połączona z relokacją 3 obwałowań (wariant II). W praktyce II wariant oznacza korzystniejszą łączność ekologiczną koryta Wisły z terenami zalewowymi o powierzchni 760 ha, które w wyniku relokacji obwałowań w naturalny sposób byłyby zalewane w trakcie wysokich wezbrań. Na terenach tych znajdują się odcięte starorzecza, z czego największe zlokalizowane jest w obszarze Natura 2000 PLB120005 Dolina Dolnej Skawy w sołectwie Miejsce w gm. Spytkowice. Przy niewielkim nakładzie robót ziemnych najlepszym rozwiązaniem jest tutaj trwałe połączenie Wisły z istniejącym, starym zakolem co pozwoliłoby na odzyskanie 4 km biegu rzeki. Z kolei na części obszaru Natura 2000 Puszcza Niepołomicka PLB120002, bez uszczerbku dla przedmiotów jego ochrony relokacja

obwałowania umożliwiłaby zainicjowanie procesów siedliskotwórczych w kierunku rozwoju ekosystemów zależnych od wód. Dla Krakowa oznaczałoby to nieznaczne pogorszenie redukcji rzędnych fali powodziowej tj. o ok. 6 cm, natomiast w przypadku Wisły poniżej Raby o ok. 8 cm.