Identyfikacja i opis zmian morfologii koryta Wisły wywołanych obwałowaniem i regulacją wraz z oceną ich wpływu na ryzyko powodziowe

Załącznik 1

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

Autor:

Janusz Żelaziński

Warszawa, kwiecień 2014

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie ……. 3

2. Identyfikacja i opis zmian morfologii koryta Wisły wywołanych przez regulację …… 3

3. Ocena wpływu zidentyfikowanych zmian morfologicznych na zagrożenie powodziowe . 17

4. Wnioski …….. 25

5. Wykorzystane materiały …….. 26

1. Wprowadzenie

Przedmiotem zainteresowania są oddziaływania prac hydrotechnicznych na ryzyko powodziowe. Rozważany jest odcinek Wisły pomiędzy ujściem Soły (kilometr 1,8; powierzchnia zlewni 5304 km^2), a ujściem Dunajca (kilometr 160,6; powierzchnia zlewni 12997 km^2). Niniejsze opracowanie obejmuje następujące zagadnienia:

a) identyfikacja i opis zmian morfologii koryta Wisły wywołanych przez regulacją,

b) ocena wpływu zidentyfikowanych zmian morfologicznych na zagrożenie powodziowe.

2. Identyfikacja i opis zmian morfologii koryta Wisły wywołanych przez regulację

Łajczak (1992; 1995) analizując dostępne mapy i inne dane szczegółowo opisał ewolucję zmian kształtu koryta górnej Wisły w okresie 1737 – 1990.

Oddziaływanie człowieka na rzekę można podzielić na dwie fazy:

1. Pierwsza najdłużej trwająca faza rozpoczęła się w epoce brązu i trwała do połowy 19 wieku, gdy rozpoczęto regulację rzeki. Wskutek rozwoju rolnictwa tj. wycinki lasów i zamiany dawnych terenów leśnych w grunty orne znacząco wzrosła erozja terenu i systematycznie wzrastała dostawa produktów erozji do cieków. Wzrosła intensywność transportu rumowiska wleczonego (dennego) i zawieszonego w ciekach. Powodowało to powstawanie koryta roztokowego w miejsce typowego dla terenów leśnych koryta meandującego oraz systematyczne poszerzanie i wypłycanie koryta. Skutki rozwoju rolnictwa widać szczególnie na odcinku Wisły środkowej, gdzie dominuje szerokie koryto roztokowe z licznymi bocznymi ramiona i wyspami oraz płyciznami utrudniającymi spływ lodów i żeglugę. Proces ten zaznaczył się również na odcinku Wisły górnej.

2. Druga faza rozpoczęła się po 1840 roku. Rozpoczęto regulację rzeki. Intensywność prac regulacyjnych wzrosła po powodzi w 1884 roku. Wykonano m.in. wiele budowli zwiększających głębokości szlaku żeglownego. Zastosowano następujące zabiegi inżynierskie:

- skrócenie biegu rzeki poprzez odcięcie wybranych meandrów (w 19 wieku),
- wybudowanie szeregu kamiennych budowli poprzecznych celem zwężenia koryta (po 1840 roku),
- budowa obwałowań przeciwpowodziowych (po 1890 roku)
- budowa zapór i stopni wodnych na Wiśle i jej dopływach w celu sterowania odpływem, retencjonowania wód, ochrony przed powodziami i produkcji energii (po 1920 roku na

dopływach, a po 1950 roku również na Wiśle). Szczególne znaczenie ma tu wybudowanie kaskady 6 stopni wodnych na Wiśle.

Główne prace regulacyjne wykonano w latach 1890 – 1960.

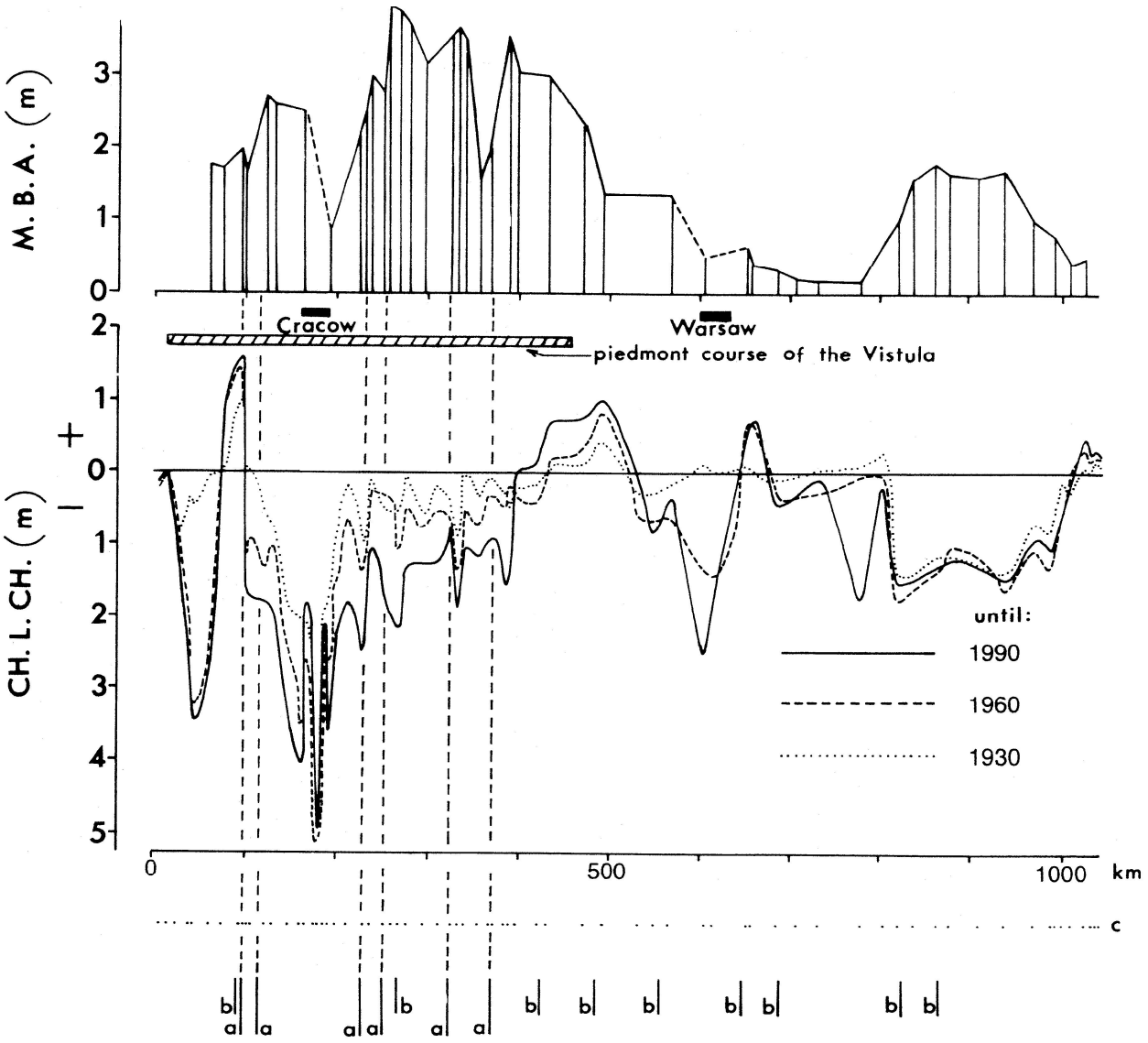
Najważniejsze zidentyfikowane zmiany geomorfologiczne wywołane regulacją górnej Wisły są następujące:

Skrócenie biegu rzeki

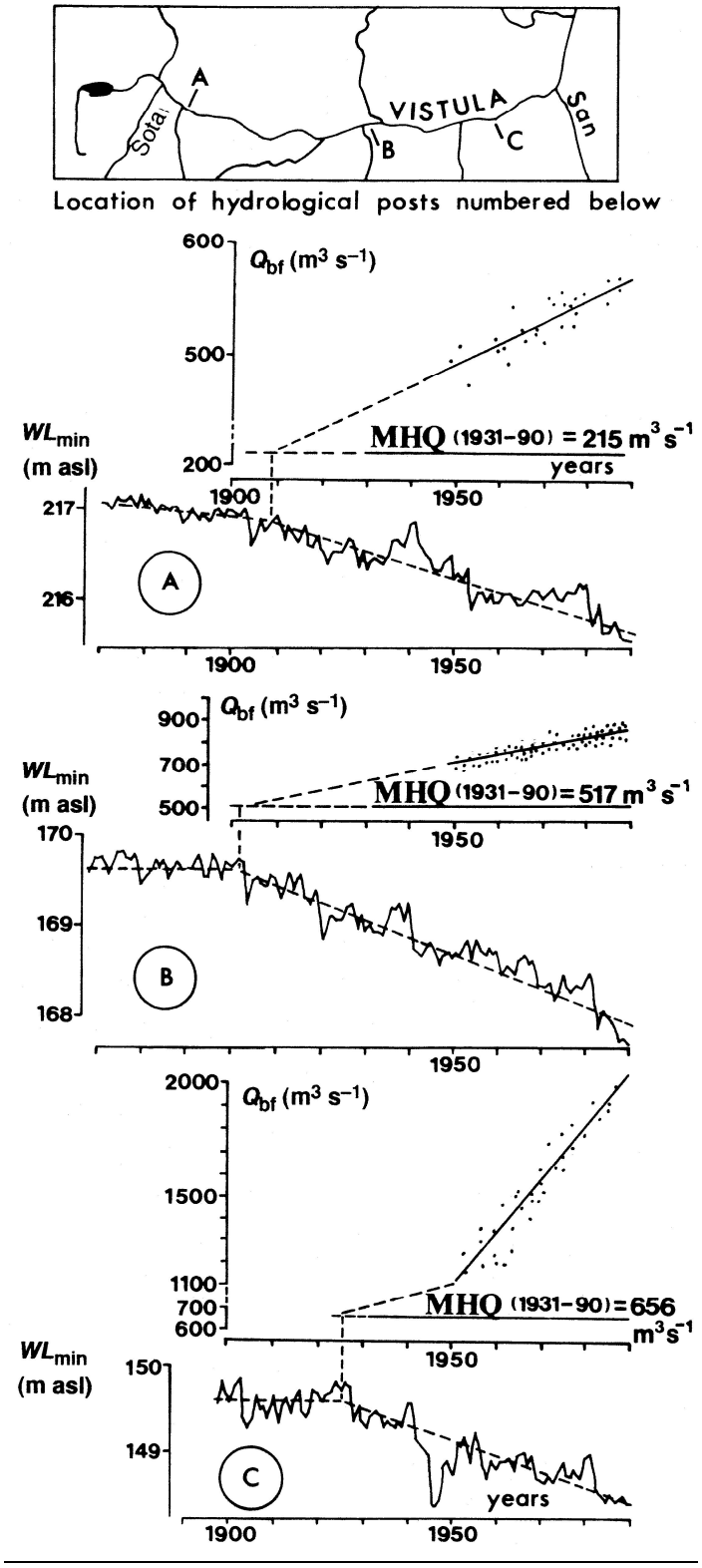
Zmiany kształtu koryta w okresie 1737 – 1990 przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Do 1850 roku koryto charakteryzowało się licznymi meandrami, które oczywiście zmieniały się w wyniku naturalnych procesów erozyjno – akumulacyjnych, ale liczba meandrów i związana z tą liczbą długość koryta rzeki nie ulegała istotnym zmianom. Około 1840 roku rozpoczęto prace regulacyjne, ale w ciągu następnych 60 lat nie spowodowały one znaczącego skrócenie rzeki. Istotne skrócenie (poprzez likwidację meandrów) zanotowano po 1900 roku. Wykorzystując dane z Tablicy 1 w pracy (Łajczak A. 1992) uzyskujemy poniższe oszacowania zmiany długości odcinków Ujście Soły – Centrum Krakowa oraz Centrum Krakowa – ujście Dunajca (tab. 1).

Tab. 1. Wartości redukcji długości Wisły.

Odcinek rzeki Wisły	Długość odcinka w 1882 roku (km)	Długość odcinka w 1990 roku (km)	Redukcja długości odcinka wynikająca z regulacji %
Ujście Soły – Centrum Krakowa	98,4	67,3	31.6
Centrum Krakowa – Ujście Dunajca	96.0	85,5	10,9



Rys. 1. Zmiany kształtu koryta rzeki Wisły wywołane regulacją w okolicy Oświęcimia. Znaczące skrócenie długości koryta wystąpiło po roku 1900. a,b – koryto rzeki, c – budowle regulacyjne, d – tereny zalewowe pomiędzy wałami, e – zapory, zbiorniki, f – wały przeciwpowodziowe, g – okres regulacji rzeki, h – okres najbardziej intensywnych prac regulacyjnych.
Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.



Rys. 2. Zmiany kształtu koryta rzeki Wisły wywołane regulacją poniżej Krakowa. Rysunek pokazuje skrócenie i zwężenie koryta rzeki rozpoczynające się w połowie XIX wieku. Symbole zdefiniowano w podpisie pod rys. 1 Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.

Zwężenie koryta w wyniku regulacji

Budowle regulacyjne, a w szczególności tamy poprzeczne powodują zwężenie koryta. Wykorzystując dane z Tablicy 1 w pracy (Łajczak A. 1992) uzyskujemy poniższe oszacowania zmiany średniej szerokości koryta dla odcinków Ujście Soły – Centrum Krakowa oraz Centrum Krakowa – ujście Dunajca

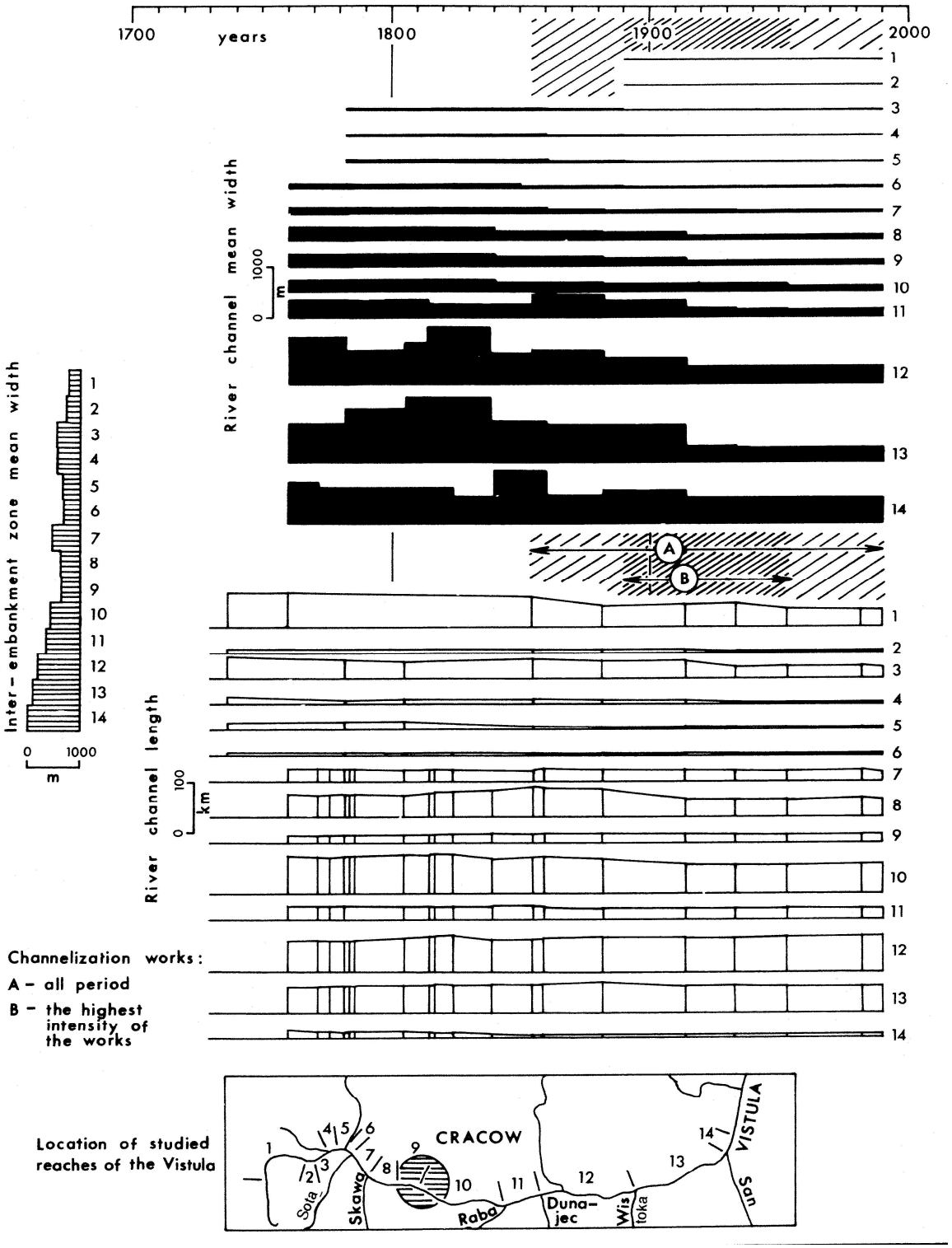
Tab. 2. Wartości redukcji średniej szerokości koryta Wisły w wyniku redukcji.

Odcinek rzeki Wisły	Średnia szerokość koryta w roku1914 (m)	Średnia szerokość koryta w roku1990 (m)	Redukcja średniej szerokości koryta wynikająca z regulacji %
Ujście Soły – Centrum Krakowa	135	95	29,6
Centrum Krakowa – Ujście Dunajca	190	150	21,1

Uwaga:

Podano wielkości zwężenia koryta w latach 1914 – 1990, ze względu na brak danych z okresu wcześniejszego.

Graficzną prezentację zmian długości i szerokości koryta Wisły wynikających z regulacji przedstawiono na rys. 3 (źródło: Łajczak A. 1995)



Rys. 3. Zmiany wybranych parametrów koryta i terenu zalewowego górnej Wisły w ciągu ostatnich 250 lat oszacowane na podstawie map. Trend malejący długości i średniej szerokości koryta rozpoczął się około roku 1900 jako skutek regulacji. A – cały okres regulacji, B – okres najbardziej intensywnej regulacji. Na dole rysunku przedstawiono schemat analizowanego odcinka rzeki.
Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.

Zwężenie koryta wielkiej wody w wyniku obwałowania

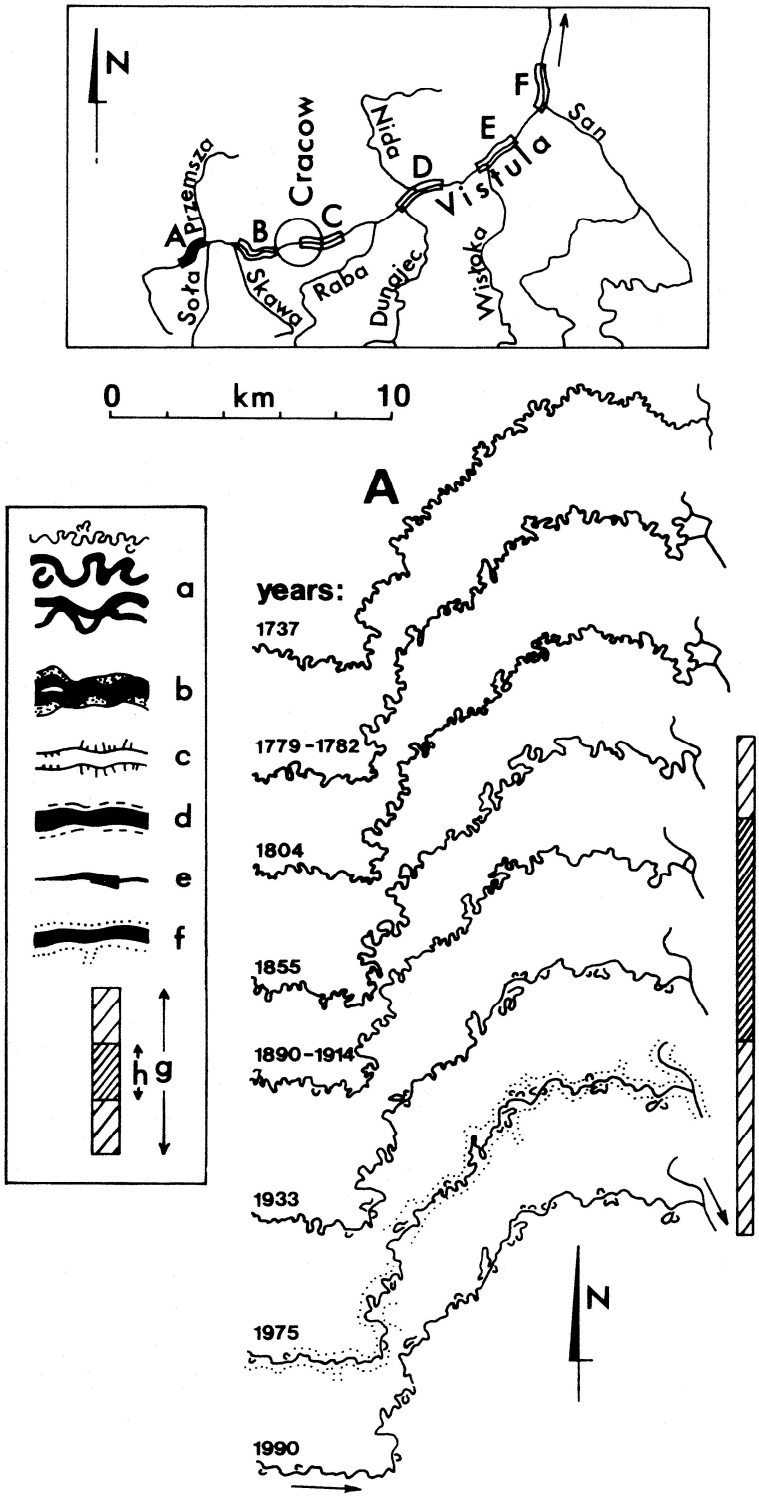
Wody wielkiej historycznej powodzi z 1813 roku płynęły korytem nieobwałowanym. Znamy w przybliżeniu maksymalny przepływ tej powodzi – 3300 m^3/s oraz maksymalny stan wody w Krakowie 995 cm (źródło: Ocena stanu zabezpieczenia powodziowego Miasta Krakowa 2012). Po 1890 roku zaczęto budować obwałowania górnej Wisły – prace te są kontynuowane do dnia dzisiejszego. Wałami odcięto setki metrów doliny Wisły zwężając szerokość koryta wielkiej wody. W wyniku obwałowania bardzo istotnie zmniejszyła się przepustowość koryta wielkiej wody. Istotnie zmniejszyła się również retencja korytowa. Czynniki te musiały spowodować podniesienie maksymalnych rzędnych wielkich wód oraz wzrost ryzyka powodzi. Powstaje pytanie: jaki byłby aktualnie maksymalny stan wody w Krakowie w przypadku wystąpienia powodzi o rozmiarach tej z 1813 roku? Pokażemy dalej trudności związane z uzyskaniem odpowiedzi na powyższe pytanie.

Pogłębienie koryta

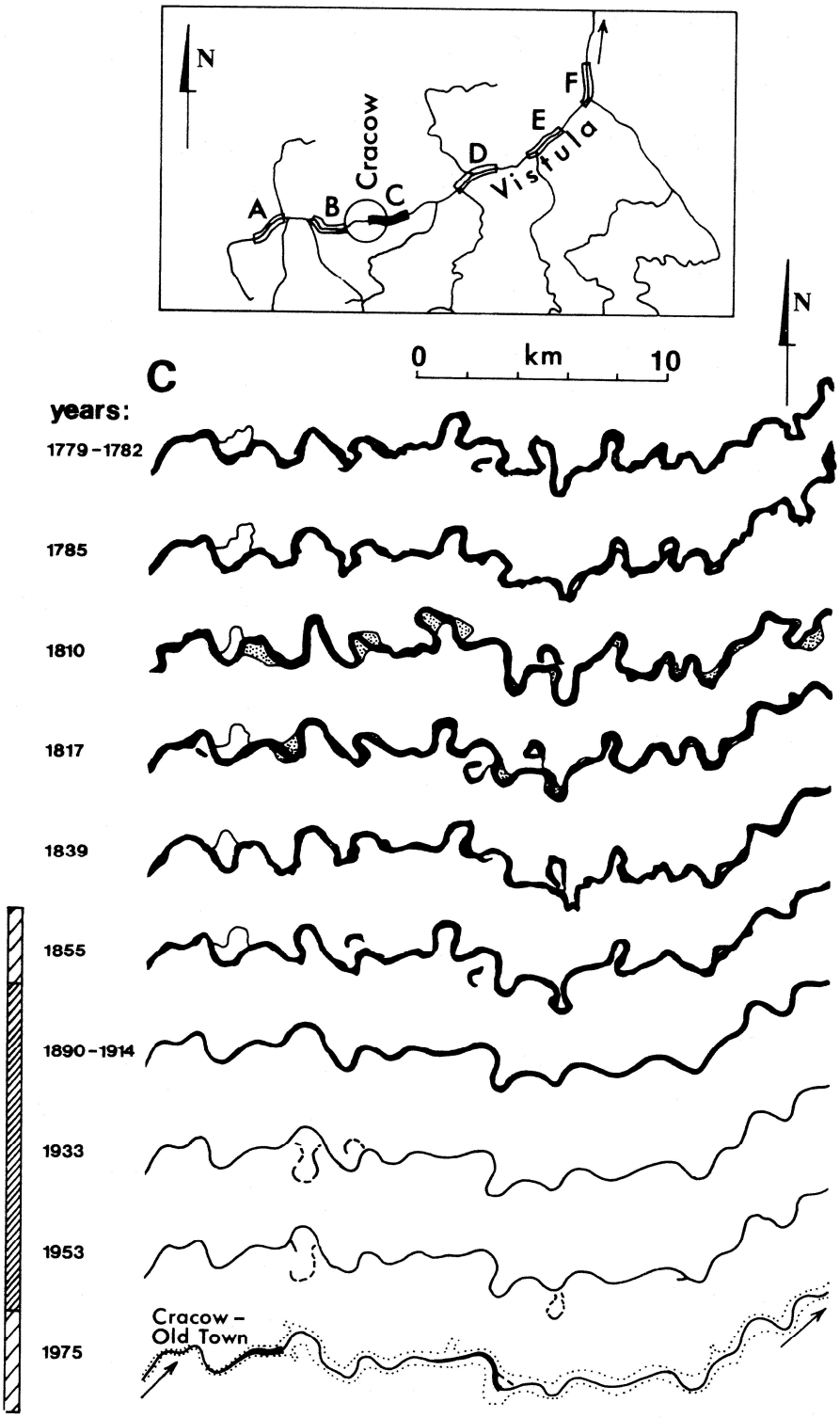
Skrócenie biegu rzeki skutkowało dwukrotnym zwiększeniem spadku zwierciadła wody, a tym samym zwiększeniem prędkości przepływu. Zwężenie koryta powoduje zmniejszenie jego przekroju poprzecznego, a tym samym również zwiększeniem prędkości przepływu. Większa prędkość przepływu oznacza zwiększenie siły transportowej rzeki **i jest to podstawowy mechanizm powodujący nasilenie erozji i znaczące pogłębienie koryta. Regulacja jest ważną, ale nie jedyną przyczyną pogłębiania koryt rzecznych. Zjawisko to ulega intensyfikacji wskutek:**

- poborów rumowiska z koryta rzeki dla budownictwa,
- zmniejszenia masy rumowiska dopływającego z obszaru zlewni wskutek zatrzymywania rumowiska przez zbiorniki retencyjne i zapory przeciwrumowiskowe realizowane na obszarze zlewni.

Pogłębianie koryta to zjawisko powszechnie obserwowane na wszystkich rzekach uregulowanych, objętych programami rozwoju sztucznej retencji oraz stanowiących źródło kruszywa budowlanego. W Krakowie dno obniżyło się o ok. 4,5 metra, a w Warszawie ok. 3 metry. Na rys. 4 i 5 pokazano deformacje koryta Wisły wynikające z regulacji i innych opisanych procesów. Obniżenie poziomu dna na całej Wiśle pokazano na rys. 6.

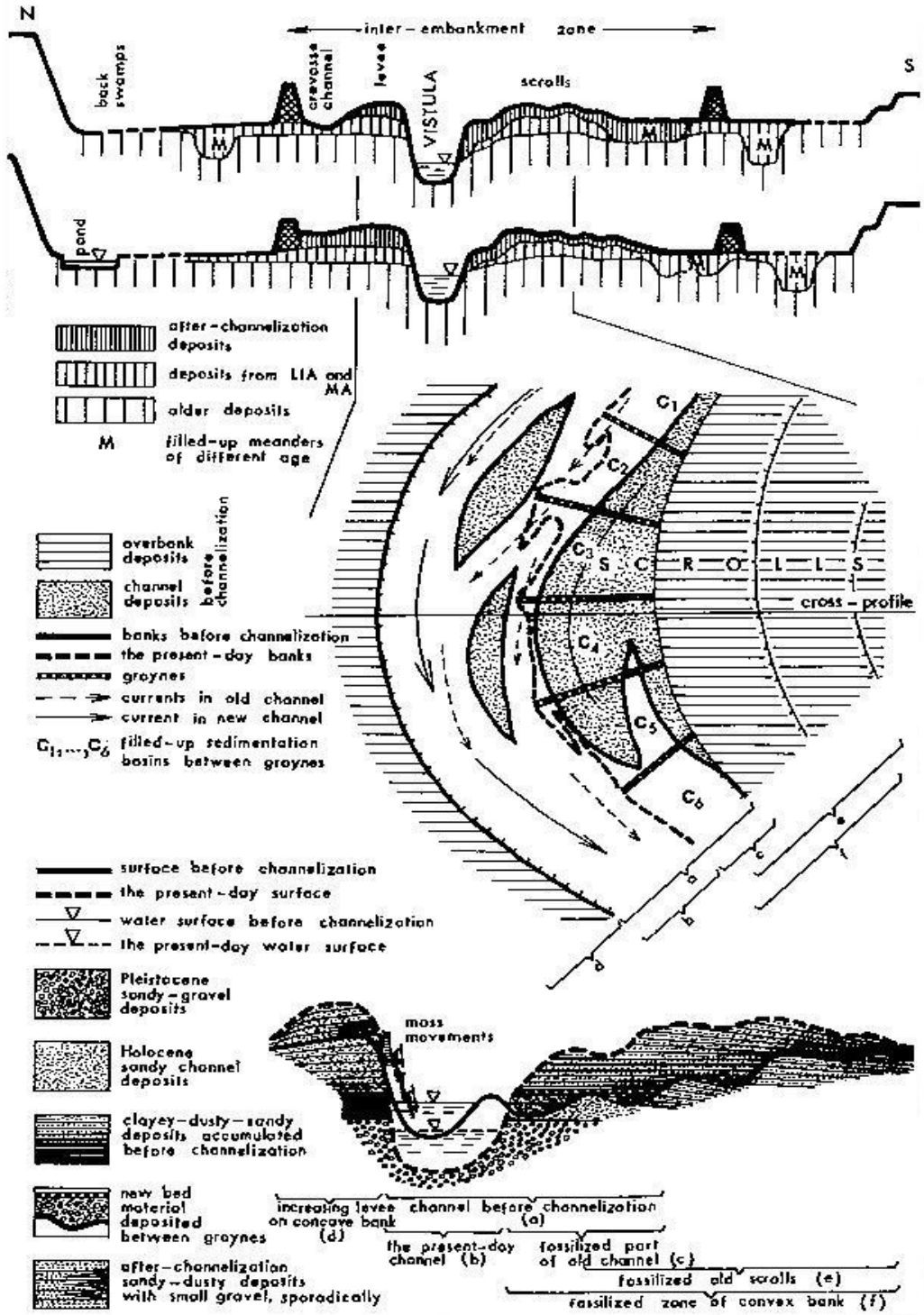


Rys. 4. Minimalny roczny poziom wody WL_{min} w wybranych posterunkach wodowskazowych górnej Wisły pokazujący obniżenie się koryta. Stacje wodowskazowe : A – Smolice, B – Karsy, C – Koło. Pogłębianie koryta wywołuje ciągły wzrost przepływu brzegowego Q_{bf} w porównaniu ze średnim wielkim przepływem MHQ. Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.



Rys. 5. Typowe warstwy osadów zakumulowanych w międzywalu górnej Wisły w ciągu ostatnich 100 lat. Pokazano przekształcenie koryta i terenu zalewowego wynikające z regulacji oraz zmiany charakteru osadów przed i po regulacji.

Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.



Rys. 6. Wielkość pogłębienia koryta wynikającego z regulacji, reprezentowane przez ujemne wartości zmian poziomu koryta (CH.L.CH.) oraz średnie grubości warstwy osadów między tamami porzecznymi i w terenie zalewowym (MBA).

Źródło: Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850-1990, one the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, River Geomorphology. Edited by Edward J.Hickin John Wiley & Sons Ltd.

Sedymentacja rumowiska w terenie zalewowym

Według Łajczaka (1995) proces wywołanej regulacją sedymentacji rumowiska niesionego przez rzekę w terenie zalewowym można podzielić na trzy fazy:

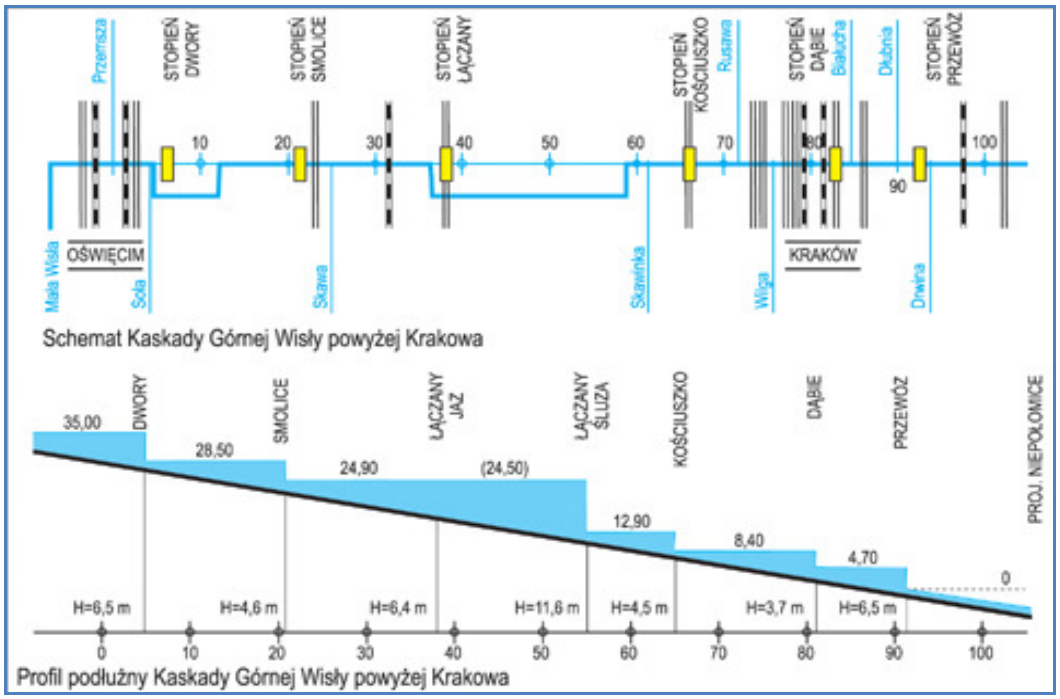
- 1840 - 1890: Likwidacja szeregu meandrów oraz budowa tam poprzecznych spowodowały pogłębianie koryta oraz sedymentację rumowiska w przestrzeniach pomiędzy tamami poprzecznymi. Po kolejnych powodziach występowało osadzanie się drobnych frakcji rumowiska w ternie zalewowym.
- 1890 – 1950: Kontynuacja budowy tam poprzecznych i likwidacji meandrów oraz budowa wałów przeciwpowodziowych powodowała szybkie pogłębianie i zwężanie koryta. Skutkowało to bardzo intensywnym osadzaniem rumowiska w przestrzeniach pomiędzy tamami poprzecznymi oraz w ternie zalewowym (w międzywalu). Na rys. 5 pokazano schematycznie procesy pogłębiania koryta głównego oraz osadzania rumowiska w międzywalu Wisły. Na rys. 6 pokazano, iż powyżej Krakowa średnia grubość warstwy osadów zgromadzonych w w międzywalu jest rzędu 2,5 – 3,0 metra, natomiast poniżej Krakowa dochodzi do 4 metrów. Żyzne osady zgromadzone w międzywalu szybko porastały roślinnością. Procesy te spowodowały dramatyczne zmniejszenie przepustowości międzywala.
- Po 1950 roku zarejestrowano znaczące zmniejszenie ilości rumowiska niesionego przez rzekę. Rumowisko zatrzymywane jest przez zbiorniki retencyjne wybudowane na Wiśle (Goczałkowice) i jej dopływach (Sole, Przemszy, Skawie, Rabie). Na małych potokach w zlewni górnej Wisły wybudowano znaczną liczbę zapór przeciwrumowiskowych, których jedynym zadaniem jest zatrzymywanie rumowiska. Opisane procesy oraz w szczególności budowa sześciu stopni Kaskady Górnej Wisły. Spowodowały stabilizację koryta, co oznacza osiągnięcie nowego stanu równowagi procesów korytowych odpowiadającego aktualnemu stanowi zabudowy hydrotechnicznej. Istotny wyjątek stanowi tu sytuacja poniżej stopnia Przewóz tj. ostatniego dotychczas wybudowanego stopnia Kaskady Górnej Wisły.

Kaskada górnej Wisły

W okresie międzywojennym nad dolnym Sanem powstał Centralny Okręg Przemysłowy (COP). COP wymagał sprawnego połączenia transportowego ze śląskimi kopalniami węgla. Infrastruktura drogowa i kolejowa była wówczas stosunkowo słabo rozwinięta i powstała koncepcja wykorzystania drogi wodnej Wisły. Górna Wisła (powyżej ujścia Sanu) była zbyt płytka do uprawiania żeglugi towarowej i wymagała kanalizacji, tj. budowy kaskady stopni wodnych zapewniających dostateczną głębokość drogi wodnej. Po wojnie wrócono do tej koncepcji budując kolejne stopnie kaskady.

Schemat kaskady pokazano na rys.7. Budowę kolejnego stopnia wodnego Niepołomice zaplanowano jako element szlaku żeglugowego górnej Wisły. Szlak ten miał być wykorzystywany przede wszystkim do transportu towarów masowych, w tym zwłaszcza węgla, którego załadunek odbywałby się w porcie rzecznym w Tychach, a miejscem docelowym byłyby między innymi elektrociepłownia Łęg w Krakowie, huta żelaza w Nowej Hucie (obecnie Huta Sędzimira) oraz elektrownia w Połańcu. Żeglugę na górnej Wiśle miał umożliwić system 16 stopni wodnych, poczynając od stopnia Dwory pod Oświęcimiem do stopnia Koćmierzów w pobliżu Sandomierza. W latach 1949 - 2003 wybudowano sześć z planowanych stopni (od stopnia Dwory do stopnia Przewóz), czyli średnio jeden stopień na 9 lat. Pomimo ukończenia ciągłego systemu stopni wodnych zapewniających ciągłość szlaku żeglugowego pomiędzy portem w Tychach i stopniem Przewóz w bezpośrednim sąsiedztwie Huty Sędzimira, szlak ten nie jest wykorzystywany do transportu towarów masowych, w tym między innymi dowozu węgla do elektrociepłowni Łęg w Krakowie czy Huty Sędzimira. Jest to spowodowane małą opłacalnością transportu wodnego na niewielkie odległości (konieczność kilkakrotnego przeładunku towaru, zanim dotrze on do miejsca przeznaczenia), brakiem środków na utrzymanie właściwej głębokości toru wodnego poprzez bagrowanie dna koryta Wisły i długotrwałym utrzymywaniem się przepływów niżówkowych na górnej Wiśle, uniemożliwiających żeglugę barek nawet w przypadku bagrowania toru wodnego.

Przyjęte w 1999 roku przez KERM „Założenia polityki transportowej państwa na lata 2000 – 2015" stwierdzają, że *„nie rysują się perspektywy rozwoju śródlądowego transportu wodnego – niezbędne inwestycje są bowiem zbyt kosztowne przy ogromnych trudnościach w konkurencji z transportem lądowym"*. **Wypada zgodzić się z tym ostatnim dokumentem.** Struktura przewozów w Republice Federalnej Niemiec, gdzie eksploatowane są największe drogi wodne Europy (1,96% przewozów krajowych z wykorzystaniem dróg wodnych) świadczy o marginalnym znaczeniu transportu wodnego i dominującym transportu drogowego.



Rys. 7. Schemat Kaskady Górnej Wisły – materiały RZGW Kraków.

Ostatnim wybudowanym jest stopień Przewóz w km 92+150 Wisły. Proponowany aktualnie stopień Niepołomice jest kolejnym elementem Kaskady Górnej Wisły. Dotychczas deklarowanymi głównymi celami budowy stopnia Niepołomice były:

- Wydłużenie (o 10 km) Drogi Wodnej Górnej Wisły (Kaskady Górnej Wisły), umożliwienie wykorzystania Wisły w celach żeglugowych i turystycznych. Po wybudowaniu stopnia długość drogi wodnej wyniosłaby ok. 100 kilometrów.
- Zapobieżenie skutkom dotychczasowej oraz zahamowanie dalszej erozji dna Wisły poniżej istniejącego stopnia Przewóz.

Bezzasadność inwestowania w drogę wodną opisano wyżej. Erozja wywołuje łańcuch negatywnych skutków społeczno–ekonomicznych i środowiskowych. **Zatem cel ochrony przed erozją można traktować jako uzasadniony.** Budowa kolejnego stopnia nie jest jednak dobrym rozwiązaniem. Erozja dna poniżej stopnia Niepołomice **wystąpi nieuchronnie, jeśli stopień zostanie wykonany.** Erozja jest zjawiskiem typowym i występuje poniżej wszystkich budowli piętrzących. W wielu przypadkach zjawisko to przyjmuje rozmiary groźne, zmuszając do kosztownych działań zapobiegawczych. Dotychczas w Polsce działania te polegają na budowie kolejnych urządzeń piętrzących. Oto przykłady polskie:

- Poniżej stopnia Włocławek na Wiśle i stopnia Dębe na Narwi wybudowano masywne tamy poprzeczne (zatopione) podwyższające poziom wody. Budowle te są niszczone przez wodę i w przypadku Włocławka, gdzie erozja dna sięga 3 metrów i grozi katastrofa budowlana stopnia lansuje się budowę kolejnego stopnia w Nieszawie.
- Erozja dna Odry poniżej stopnia Brzeg Dolny uniemożliwia żeglugę, co wymusiło budowę kolejnego stopnia Malczyce.
- Erozja dna Dunajca poniżej zespołu zbiorników Rożnów i Czchów wymusiła budowę progów stabilizujących poziom dna i projektowana jest budowa dalszych progów (w postaci elektrowni wodnych o niskim poziomie piętrzenia).

Zjawisko silnej erozji poniżej budowli piętrzących jest powszechne i prowadzone były (głównie w Niemczech i USA) badania nad możliwością jej zapobiegania. W wyniku tych badań stwierdzono, że przyczyną erozji jest zatrzymanie przez budowlę transportu rumowiska rzecznego. Zapobieganie poprzez budowę kolejnych zapór, progów czy stopni jedynie przenosi erozję w przestrzeni (poniżej kolejnego stopnia) i kontynuacja takich działań prowadzi do absurdalnego wniosku, że wszystkie rzeki trzeba zabudować kaskadami, aż do ich ujścia do morza (jeżeli pogodzimy się ze skutkami dla wybrzeża morskiego takimi jak np. likwidacja Mierzei Wiślanej budowanej przez rumowisko niesione Wisłą). Racjonalne wnioski wyciągnęli z tego faktu Niemcy i poniżej ostatniego stopnia Kaskady Renu w Karlsruhe dosypują do rzeki olbrzymie masy żwiru wydobywanego w różnych miejscach i transportowanego specjalnie dostosowanym taborem. **Reasumując, budowa stopnia Niepołomice nie likwiduje erozji lecz powoduje jej intensywne uruchomienie poniżej tego nowego stopnia, co w perspektywie wymusi budowę kolejnego stopnia. Inwestycja nie rozwiąże również problemu żeglugi na górnej Wiśle.**

Z punktu widzenia skutków dla geomorfologii koryta górnej Wisły kaskada spowodowała:

- Stabilizację stanu koryta pomiędzy zasięgiem cofki stopnia Dwory i stopniem Przewóz. Jest to stabilizacja stanu koryta wynikającego z przeprowadzonej regulacji. **Dalej zostanie wykazane, że jest to stan niekorzystny ze względu na ryzyko powodzi.**
- **Szybką erozję koryta poniżej stopnia Przewóz. Z punktu widzenia ryzyka powodzi jest oddziaływanie niekorzystne.**

Szczegółowe zalecenia dotyczące możliwych zabiegów rewitalizacyjnych poniżej stopnia Przewóz sformułowano w opracowaniu: „Opinia o celowości budowy stopnia Niepołomice na Wiśle i wybranych skutkach tej budowy" (Wyżga B., Radecki-Pawlik A. 2013).

3. Ocena wpływu zidentyfikowanych zmian morfologicznych na zagrożenie powodziowe

Na etapie formułowania programu rewitalizacji zakładano możliwość przeprowadzenia badań symulacyjnych dokumentujących wpływ robót hydrotechnicznych na ryzyko powodzi. Zakładano możliwość pokazania maksymalnych stanów wody i przepływów dużej fali powodziowej (np. fali z 2010 roku) w poszczególnych profilach górnej Wisły, przy założeniu stanu koryta quasi naturalnego (np. z 1850 roku) na tle zaobserwowanych stanów i przepływów w 2010 roku. Takie porównanie pozwałoby w sposób ilościowy pokazać wpływ hydrotechniki na maksymalne stany/przepływy. Analiza dostępnych materiałów pokazała, że wykonanie takich badań jest nie realne. Główne przyczyny powyższego stwierdzenia są następujące:

- Brak danych o geometrii koryta i terenu zalewowego. Przegląd dostępnych materiałów historycznych (m. i. Roczników Hydrologicznych) prowadzi do wniosku, że dostępne są w archiwach tylko przekroje poprzeczne koryta zwilżonego w nielicznych przekrojach, gdzie wykonywano pomiary przepływu i to tylko po roku 1921 t. j. po wykonaniu obwałowań i głównych prac regulacyjnych.
- Brak hydrogramów stanów i przepływów dla wielkich powodzi historycznych – 1813 i 1903. Dostępne są tylko oceny maksymalnych stanów i przepływów w nielicznych profilach wodowskazowych Uniemożliwia to kalibrację modelu hydrodynamicznego dla warunków koryta naturalnego.

Wymienione przyczyny zdecydowały o rezygnacji z ilościowej oceny wpływu regulacji na maksymalne stany i przepływy. Podjęto natomiast próbę jakościowej oceny oddziaływania regulacji na ryzyko powodzi. **Należy podkreślić, że na zmiany geomorfologii koryta Wisły i wzrost ryzyka powodzi w dolinie Wisły miały istotny wpływ roboty regulacyjne na górskich dopływach Wisły.** Dlatego też analizę rozpoczniemy od omówienia skutków regulacji dopływów.

Skutki regulacji i tak zwanej zabudowy potoków i rzek karpackich opisano w opracowaniu: Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J. 2005. „Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich”. Należy podkreślić, że przeprowadzona krytyka skutków regulacji jest udostępniona przez organizację państwową, odpowiedzialną za gospodarkę wodną i zatrudniającą wybitnych, doświadczonych hydrotechników. Nie są to zatem opinie organizacji pozarządowych zorientowanych na ochronę środowiska traktowane często jako bezzasadne fobie ekologiczne niekompetentnych zielonych, lecz zrównoważone opinie specjalistów.

Oto wybrane cytaty:

„W celu zmniejszenia zagrożenia powodziowego w dolinach rzek karpackich, po 1904 roku podjęto intensywne prace regulacyjne, które kontynuowano do lat 30. Regulacje objęły wówczas dolne i środkowe odcinki głównych rzek karpackich i polegały na prostowaniu koryt przekopami przecinającymi niektóre zakola, zastępowaniu odcinków wielonurtowego koryta sztucznym pojedynczym korytem, zwężaniu koryt i umacnianiu brzegów wklęsłych przed erozją kamiennymi umocnieniami. Prace regulacyjne wznowiono z końcem lat 50., obejmując nimi w tym czasie przede wszystkim środkowe i górne odcinki karpackich dopływów Wisły oraz ich beskidzkie i podhalańskie dopływy.

Efektem regulacji prowadzonych w podgórskich odcinkach rzek było skrócenie ich biegu i przede wszystkim znaczne zwężenie koryt (nawet do 40% szerokości sprzed regulacji). Natomiast w górskich biegach rzek regulacje polegały przede wszystkim na zwężaniu koryt i zastępowaniu ich wielokorytowych i wielonurtowych odcinków sztucznym jednonurtowym korytem."

„Okazało się jednak, że poziomej stabilizacji biegu rzek karpackich towarzyszyło obniżanie się dna rzek, którego rozmiary oraz tempo w wielu odcinkach przybrały dramatyczną skalę. W posterunkach wodowskazowych zlokalizowanych w dolnych i środkowych biegach karpackich dopływów Wisły minimalne roczne stany wody obniżyły się w ciągu XX wieku o 1,3-3,8 m, przy czym w wielu przekrojach tempo pogłębiania się koryt było wyraźnie większe w drugiej połowie XX wieku. W drugiej połowie stulecia intensywne obniżanie się dna rzek zaznaczyło się także w górnym biegu niektórych karpackich dopływów Wisły i w ich beskidzkich dopływach. Rozmiary obniżenia się dna rzek sięgnęły tu nawet 2-2,5 m, doprowadzając w wielu miejscach do rozcięcia aluwialnych den dolin i całkowitego wyprzątnięcia aluwiów z koryt, a w konsekwencji do zamiany koryt aluwialnych w koryta skalne".

Jako ważne przyczyny obniżania się poziomu dna wymieniono m. in. następujące roboty hydrotechniczne:

a) *„przeciwerozyjną zabudowę brzegów koryt i wytyczanie tras regulacyjnych rzek tak, aby uniemożliwić podcinanie zboczy dolin, stożków napływowych dopływów i progów wyższych teras*

b) *wznoszenie zapór przeciwrumowiskowych na potokach górskich i obudowę ich brzegów, a niekiedy całych koryt (żłoby kamienne)*

c) *przegradzanie rzek głębokimi zbiornikami zaporowymi przechwytującymi całość rumowiska dennego dostarczanego z ich wyższych odcinków"...*

Bezpośrednie skutki regulacji dla ryzyka powodzi podsumowano następująco:

- Obniżenie się stanów wezbraniowych **(niewielkich wezbrań; nie dotyczy to katastrofalnych powodzi)** w rzekach poniżej gęstej strefy korzeniowej roślinności nadrzecznej ułatwiło podmywanie brzegów i szybkie ich cofanie, co zagraża obwałowaniom.
- W wyniku prowadzonych robót istotnie zwiększyły się zagrożenia powodziowe, zwłaszcza poniżej długich odcinków zabudowanych, ponieważ przyspieszenie odpływu wody zawsze skutkuje zwiększeniem intensywności maksymalnych przepływów powodziowych.
- Paradoksalnie działania podejmowane w celu zahamowania erozji w sposób groźny zwiększyły jej intensywność.
- Kosztowne prace prowadzone w celu ograniczenia szkód powodowanych przez powodzie i erozję zwiększyły te szkody.

Są to wnioski potwierdzone badaniami przeprowadzonymi w wielu krajach. I tak np.:

Regulacja i obwałowanie górnego Renu spowodowały:

- skrócenie rzeki z 354 do 273 km,
- zmniejszenie powierzchni terenu zalewowego z 1000 km^2 do 140 km^2.

Skutki ze względu na ryzyko powodziowe:

- powódź o powtarzalności ocenianej na początku XXs wieku na 100 lat w stuleciu tym wystąpiła sześciokrotnie.
- czas przepływu fali powodziowej zmniejszył się z ok. 64 h do 23 h. Zwiększyło to ryzyko nałożenia się fal z dopływów bocznych na falę Renu
- podniesienie przepływów maksymalnych w Kolonii o ok. 700 - 800 m^3/s i odpowiednio stanów wody o 40 cm

Opisane spostrzeżenia spowodowały podjęcie niezwykle kosztownego programu częściowej renaturyzacji górnego Renu.

W opracowaniu „Ocena wybranych robót hydrotechnicznych finansowanych z pożyczki Europejskiego Banku Inwestycyjnego” (Żelaziński J., Wawręty R., 2005) przeprowadzono analizę skutków przyspieszenia odpływu i skrócenia biegu rzeki. Wykorzystano dobrze uzasadniony model matematyczny formowania się odpływu powodziowego oparty na teorii chwilowego

geomorfologicznego hydrogramu jednostkowego (CGHJ); (Rodriquez - Iturbe, I. Valdes, J. B. ,1979). Model ten jest podstawą wykorzystywanego w praktyce Instytutu Meteorologii I Gospodarki Wodnej (IMGW) modelu prognostycznego. Dobre wyniki symulacji wezbrań przy użyciu tego modelu pozwalają na stwierdzenie, że teoria (CGHJ) w sposób adekwatny opisuje proces formowania się odpływu. W modelu CGHJ maksymalna rzędna chwilowego geomorfologicznego hydrogramu jednostkowego *qp* wyrażona jest wzorem:

$$qp = \frac{V}{L} A \qquad (1)$$

gdzie:

V – prędkość przepływu

L – długość cieku

A – parametr zależny od geomorfologicznej struktury cieku.

Maksymalny przepływ fali powodziowe, przy danym opadzie jest proporcjonalny do *qp* (wynika to z teorii hydrogramu jednostkowego). Można przyjąć, że parametr A nie zmienia swej wartości w wyniku regulacji cieku. Natomiast regulacja:

- zwiększa prędkość przepływu V (w wyniku zwężenia koryta i zmniejszenia oporów ruchu),
- zmniejsza długość cieku (wskutek wyprostowania koryta).

Obydwa wymienione oddziaływania omówiono w „Zasadach...” , gdzie napisano m.in. że poprzez regulację zwężono koryta nawet do 40% ich początkowej szerokości.

Wprowadźmy oznaczenia:

$$Kv = \frac{Vr}{Vn} \qquad (2)$$

gdzie:

Vr – prędkość przepływu w korycie uregulowanym

Vn – prędkość przepływu w korycie naturalnym;

$$Kl = \frac{Lr}{Ln} \qquad (3)$$

gdzie:

Lr – długość cieku uregulowanego,

Ln – długość cieku naturalnego

Wykorzystując równania (1); (2) i (3) otrzymujemy wzór:

$$Qr = Qn\frac{Kv}{Kl} \qquad (4)$$

gdzie:

Qr – przepływ maksymalny w korycie uregulowanym,

Qn – Przepływ maksymalny w korycie naturalnym.

Załóżmy, że w wyniku regulacji prędkość przepływu wzrosła o 10%, zaś długość cieku zmniejszyła się o 10%. Przy takich założeniach (realistycznych w świetle informacji zawartych w „Zasadch...”), Kv = 1,1, zaś Kl = 0,9. Stosunek Kv/Kl wynosi wówczas 1,22.

Oznacza to wzrost przepływu maksymalnego w wyniku zabiegów regulacyjnych 22%.

Na tym nie kończą się mechanizmy wzrostu zagrożeń powodziowych wynikających z regulacji. Występuje ponadto zjawisko zdecydowanie pogarszające sytuację. Przyspieszenie prędkości przepływu i skrócenie rzeki zmniejsza czas trwania tak zwanego deszczu krytycznego TK. Jest to czas potrzebny, aby kropla deszczu, która spadła w miejscu źródła cieku (lub ściślej w punkcie działu wodnego najbardziej oddalonym od ujścia cieku) dotarła do tego ujścia. W obliczeniach inżynierskich przyjmuje się, że przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie wystąpienia p% wywołuje deszcz nawalny o prawdopodobieństwie wystąpienia p% i o czasie trwania TK. Potoczne obserwacje potwierdzone wynikami badania struktury opadów ulewnych wykazują, że deszcze krótkotrwałe mają większe natężenie od deszczów długo trwających. Regulacja skraca czas trwania deszczu krytycznego, gdyż skraca długość rzeki i przyśpiesza prędkość przepływu. Ponieważ:

$$TKn = \frac{Ln}{Vn} \qquad (5)$$

gdzie:

TKn – czas koncentracji w korycie naturalnym, oraz:

$$TKr = \frac{Lr}{Vr} \qquad (6)$$

gdzie:

TKr – czas koncentracji w korycie uregulowanym

to wykorzystując wzory (2); (3) (5) i (6) otrzymujemy zależność:

$$TKr = TKn\frac{Kl}{Kr} \qquad (7)$$

Przy założeniu, że w wyniku regulacji o 10% zwiększy się prędkość przepływu i skróci długości rzeki łatwo obliczyć, że czas koncentracji *TKr* w korycie uregulowanym stanowi 82% czasu koncentracji *TKn* w korycie naturalnym. Oczywiście deszcz o większym natężeniu wywołuje większą kulminację fali, a zatem obok opisanego wyżej mechanizmu zwiększenia wskutek regulacji *qp* (maksymalnej rzędnej hydrogramu jednostkowego) następuje zwiększenie natężenia deszczu krytycznego.

Ilościowa ocena powiększenia przepływu o zadanym prawdopodobieństwie wystąpienia (np. wody stuletniej) wskutek spowodowanego regulacją skrócenia czasu koncentracji wymaga znajomości relacji opisującej wzrost natężenia deszczu o zadanym prawdopodobieństwie wystąpienia wskutek zmniejszenia czasu trwania deszczu. Niedźwiedź wykorzystując dane opadowe ze stacji Zakopane z okresu 1956 – 1975 wyprowadził wzór empiryczny pozwalający obliczyć sumę opadu nawalnego *H(p,t)* o czasie trwania *t* i prawdopodobieństwie wystąpienia *p*:

$$H(p,t) = A + B\ln[-\ln(1-p)]/t^{-0,397} \qquad (8)$$

Gdzie:

A; B – współczynniki empiryczne dopasowujące formułę (8) do serii danych opadowych zaobserwowanych w Zakopanem.

Dzieląc prawa stronę (8) przez *t* otrzymujemy zależność pomiędzy natężeniem opadu nawalnego *IH(p,t)* o czasie trwania *t* i prawdopodobieństwie wystąpienia *p,* a czasem trwania tego opadu:

$$IH(p,t) = A + B\ln[-\ln(1-p])/t^{0,603} \qquad (9)$$

Wprowadzając oznaczenie: C = A + $B\ln[-\ln(1-p)]$ oraz ograniczając wykładnik potęgowy do dwóch cyfr znaczących (realna dokładność współczynnika wzoru empirycznego), otrzymujemy:

$$IH(p,t) = C/t^{0,6} \qquad (10)$$

Analiza wzoru (10) prowadzi do wniosku, że natężenie deszczu krytycznego rośnie w miarę skracania się czasu trwania tego deszczu TK odwrotnie proporcjonalnie do $TK^{0,6}$

A zatem:

$$I(KTr) = I(KTn)[TKn/TKr]^{0,6} \qquad (11)$$

Wykorzystując wzór (7) obliczono, że jeśli w wyniku regulacji o 10% wzrośnie prędkość przepływu i o 10% zmaleje długość cieku to czas trwania deszczu krytycznego w korycie uregulowanym *TKr* zmaleje do 82% *TKn,* czyli czasu trwania deszczu krytycznego w cieku naturalnym. Wykorzystując wzór (11) łatwo obliczyć, że takie skrócenie czasu koncentracji spowoduje wzrost natężenia deszczu krytycznego o 13% i taki sam wzrost wywołanego deszczem krytycznym natężenia maksymalnego przepływu fali powodziowej.

Przeprowadzona analiza wykazała że jeśli poprzez regulacje o 10% przyspieszymy spływ wód powodziowych i jednocześnie o 10% skrócimy długość cieku to można oczekiwać **wzrostu natężenia maksymalnego przepływu fali powodziowej o 38%, co oznacza bardzo poważny wzrost zagrożenia powodziowego.**

DYSKUSJA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Wykorzystanie wzorów (1 –11) przy założeniu przyśpieszenia spływu i skrócenia rzeki o 25% prowadzi do zaskakującego wniosku o ponad dwukrotnym wzroście przepływu kulminacyjnego. Powstaje pytanie czy jest to wynik realistyczny. Wzory (1 – 11) otrzymano poprzez proste przekształcenia formuł powszechnie uznanych w hydrologii inżynierskiej. Zawierają one szereg uproszczeń i założeń, które mogą prowadzić do pewnych błędów oszacowania efektów końcowych to jest wzrostu kulminacji powodzi. Kluczowe znaczenie ma przyśpieszenie spływu wód powodziowych w korytach uregulowanych w stosunku do koryt naturalnych. Uzyskanie pewnych oszacowań wymaga wielkiej ilości danych o warunkach przepływu w korycie przed i po regulacji. Danych takich brak, a zdobycie ich jest mało realne. Ponadto weryfikacja wyników obliczeń jest niezwykle trudna. Wymagałaby m. in. wykonania pomiarów prędkości przepływu podczas wysokiego wezbrania przed i po regulacji. Pomiar prędkości przepływu na długim odcinku rzeki górskiej podczas wezbrania gdy rzeka prowadzi mieszaninę wody żwiru i często bloków skalnych jest poważnym problemem technicznym. Istnieją jednak przesłanki pośrednie pozwalające traktować wyniki uzyskane w ramach niniejszej oceny niezwykle poważnie. Oto niektóre z nich

W „Zasadach...”. tak opisano zagrożenia wynikające z tradycyjnej regulacji i zabudowy hydrotechnicznej:

„...gwałtowne wcięcie się rzek karpackich w XX wieku (spowodowane regulacją, przypis autora oceny)... *spowodowało, że drastycznie zmniejszyły się możliwości retencji wód wezbraniowych i akumulacji osadów pozakorytowych w ich obszarach zalewowych. Obniżaniu się dna rzek towarzyszył bowiem wzrost koncentracji przepływów wezbraniowych w pogłębionych korytach i znaczące zmniejszenie się udziału wód wezbraniowych przenoszonych w obszarach zalewowych. Wcięcie się rzek karpackich nie spowodowało jednak zmniejszenia zagrożenia powodziowego w dorzeczu górnej*

Wisły, lecz jedynie jego odsunięcie w dół biegu rzek. W górnych częściach wciętych odcinków rzek obniżenie się dna koryt umożliwiło zmniejszenie maksymalnych stanów. W rezultacie drastycznego zmniejszenia się możliwości retencjonowania wód wezbraniowych w obszarach zalewowych rzek karpackich ***znacząco zwiększyły się jednak kulminacyjne przepływy wezbraniowe notowane w dolnym końcu pogłębionych odcinków rzek przy wystąpieniu określonego przepływu w górnym końcu tych odcinków....***

Wraz z wysokimi opadami w lipcu 1997 doszło do gwałtownego ujawnienia się tego zwiększonego zagrożenia powodziowego. O ile na karpackich dopływach Wisły zanotowano wówczas przepływy o okresie powtarzalności 10-30 lat, to na odcinku Wisły od ujścia Dunajca do Sandomierza zostały przekroczone maksymalne stany zanotowane w ciągu 120 lat prowadzenia obserwacji hydrometrycznych. Istniejącą sytuację trudno uznać za zadowalającą - powoduje ona bowiem, że obecnie chronione przed zatopieniem w czasie wezbrań są przede wszystkim dna dolin rzek karpackich, gdzie słabe gleby i stosunkowo surowe warunki klimatyczne nie sprzyjają rolniczemu wykorzystaniu terenów, zwiększyło się natomiast zagrożenie powodziowe w dolnych odcinkach tych rzek w obrębie Kotlin Oświęcimskiej i Sandomierskiej ***oraz w dolinie górnej Wisły, gdzie zagrożona jest intensywna zabudowa miejska (Kraków), przemysł i wydajne rolnictwo."***

Analizując dane zawarte w „Atlasie hydrologicznym Polski" można stwierdzić, że w karpackim dorzeczu Wisły przepływy maksymalne roczne o okresie powtarzalności rzędu 100 lat są około dwukrotnie większe od przepływów o okresie powtarzalności rzędu 10 lat. W „Zasadach..." stwierdzono, że woda 10 – 30 letnia w dopływach Wisły wywołuje (w ostatnich latach) wodę 100 – letnią w Wiśle. Jest to wynik zbliżony do uzyskiwanego w oparciu o wzory (1 – 11) wyprowadzone w ramach niniejszej oceny przy założeniu, że regulacja spowodowała ponad 20% przyspieszenie spływu i skrócenie długości cieków.

Najważniejsze spostrzeżenie wynikające z przytoczonych analiz to niestacjonarność rozkładów prawdopodobieństwa maksymalnych przepływów. Wykazano, że częstotliwość występowania wielkich powodzi wzrasta wskutek regulacji. Wieloletnia seria obserwacyjna maksymalnych przepływów rocznych jest realizacją niestacjonarnego procesu losowego. Standardowe procedury obliczania maksymalnych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia zakładają stacjonarność procesu. Uzyskane wyniki są więc nieadekwatne, co tłumaczy paradoksy uzyskane na Renie (woda stuletnia występuje sześć razy w stuleciu !) i na Górnej Wiśle (opad 10 – 30 letni wywołuje wodę stuletnią w Wiśle).

Problem oddziaływania regulacji na zagrożenia powodziowe wymaga pilnie głębokich studiów, zwłaszcza w sytuacji, gdy tworzone są plany ochrony przeciwpowodziowej. **Nie można wykluczyć, że**

renaturyzacja uregulowanych cieków jest w wielu przypadkach najskuteczniejszym sposobem ograniczenia szkód powodziowych.

4. Wnioski

4.1. Regulacja Górnej Wisły spowodowała znaczące zwiększenie częstotliwości występowania katastrofalnych powodzi. Jest to skutkiem jednoczesnego oddziaływania kilku zaobserwowanych procesów:

- Zwężenie i skrócenie koryta w wyniku regulacji i obwałowania powoduje przyśpieszenie postępu fali powodziowej. Jeżeli fala o tej samej objętości przemieszcza się szybciej, to rośnie przepływ maksymalny. Ilościowa analizę tego mechanizmu opisano w p. 3 niniejszej ekspertyzy. Wniosek powyższy dotyczy zarówno koryta Wisły jak i jej dopływów.

- Przyspieszenie postępu fali w korycie Wisły sprzyja nakładaniu się kulminacji dopływów na kulminację Wisły.

- Zaobserwowano wywołane regulacją masowe odkładanie się rumowiska w terenie międzywala. Skutkuje to znaczącym zmniejszeniem przepustowości koryta wielkiej wody, a tym samym wzrostem maksymalnych rzędnych zwierciadła wody. Zjawisko to potęguje szybki porost roślinności w międzywalu pokrytym żyznymi namułami.

4.2. W opisanej sytuacji można przypuszczać, że renaturyzacja, ograniczona do wykorzystania niezabudowanych trenów w obwałowanej dolinie Wisły jako polderów jest najskuteczniejszym sposobem ograniczenia szkód powodziowych.

4.3. Wykazano, że budowa kolejnego stopnia Kaskady Górnej Wisły (stopnia Niepołomice) uruchomi intensywną erozję koryta poniżej tego stopnia ze skutkami identycznymi do skutków regulacji tj. zwiększeniem ryzyka powodzi poniżej stopnia. Wykazano, że właściwym rozwiązaniem erozji koryta poniżej stopnia Przewóz jest „dokarmianie rzeki” tj. dosypywanie poniżej stopnia rumowiska w ilości niezbędnej dla zachowania równowagi dna.

5. Wykorzystane materiały

Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J. 2005: Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich. Ministerstwo Środowiska. Warszawa. 143s.

RZGW w Krakowie, 2014: Droga Wodna Oświęcim – Kraków. Strona internetowa

Niedbała J.,: Charakterystyczne cechy wezbrania z maja i czerwca 2010 w dorzeczu Górnej Wisły. Forum Naukowo Techniczne Powódź 2010 Warszawa 28 – 29 czerwca 2010

Wodowskazy na rzekach Polski. Część II. Wodowskazy w dorzeczu Wisły i na rzekach Przymorza na wschód od Wisły, 1972. PIHM, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Dorzecze Wisły: Monografia powodzi lipiec 1997, Grela J., Słota H., Zieliński J. (red.), IMGW, Warszawa.

Dorzecze Wisły: Monografia powodzi maj czerwiec 2010, 2011, Maciejewski M., Ostojski M.S., Walczykiewicz T. (red.). IMGW-PIB, Warszawa.

Łajczak A. 1992: Changes in Geopmetric Parameters on the Vistula Channel in its Fore-Mountain Section Caused by Channelization. 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe 1992

Łajczak A. 1995: The Impact of River Regulation, 1850 – 1990, on the Chanel and Floodplain of the Upper Vistula, Southern Poland, *River Geomorphology.* Edited by Edward J. HickinJohn Wiley & Sons Ltd

Ocena stanu zabezpieczenia powodziowego Miasta Krakowa 2012. Państwowy Zespól Zarządzania Kryzysowego w Krakowie

Wyżga, B.; Radecki-Pawlik, A. 2013: „Opinia o celowości budowy stopnia Niepołomice na Wiśle i wybranych skutkach tej budowy". Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy, Kraków. Instytut Ochrony Przyrody PAN.

Żelaziński J., Wawręty R. 2005: „Ocena wybranych robót hydrotechnicznych finansowanych z pożyczki Europejskiego Banku Inwestycyjnego". Towarzystwo na rzecz Ziemi, Polska Zielona Sieć, Oświęcim/Kraków.