

## Analiza hydraulicznych skutków kaskadyzacji dolnej Wisły

**Dr hab. inż. Michał Szydłowski, dr inż. Dariusz Gąsiorowski, mgr inż. Jakub Hakiel, dr hab. inż. Piotr Zima,  
prof. dr hab. inż. Romuald Szymkiewicz prof. zw. PG  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Wzorując się na rozwiązaniach stosowanych na dużych rzekach europejskich, przed laty dla dolnej Wisły opracowano koncepcję jej kaskadyzacji. Pełną kaskadę dolnej Wisły (KDW) tworzyć miało osiem stopni wodnych: Tczew, Opalenie, Chełmno, Solec Kujawski, Ciechocinek, Włocławek, Płock, Wyszogród. Jednak po wybudowaniu w 1970 roku stopnia Włocławek zabudowę dolnej Wisły przerwano i wstrzymano. Tymczasem według wielu specjalistów z zakresu gospodarki wodnej, ponowne podjęcie tego pomysłu i jego zakończenie pozwoliłoby na wykorzystanie potencjału dolnej Wisły z wielką korzyścią nie tylko dla części Mazowsza, Kujaw i Pomorza, ale i dla całej Polski. Budowa KDW mogłaby zagwarantować zwiększenie stopnia ochrony doliny rzeki przed powodzią, wykorzystanie aktualnie marnotrawionego potencjału energetycznego, utworzenie dróg wodnych o znaczeniu międzynarodowym, polepszenie retencji wody do zaopatrzenia w nią ludności, przemysłu i rolnictwa przyległych Kujaw i Mazowsza, rozwój turystyki i rekreacji związanych z powstaniem zbiorników wodnych, a także aktywizację zawodową lokalnych społeczności, przyczyniając się jednocześnie do zmniejszenia bezrobocia.

W celu wstępnej oceny wpływu potencjalnej budowy kaskady stopni piętrzących na dolnej Wiśle na warunki przepływu w Katedrze Hydrotechniki WILiŚ PG wykonano numeryczny model hydrauliczny rzeki z uwzględnieniem koncepcji KDW. Do analizy ustalonych przepływów charakterystycznych przyjęto odcinek rzeki od Warszawy do ujścia rzeki do morza. W przypadku obliczeń transformacji fal wezbraniowych ograniczono model do odcinka rozpoczynającego się od przekroju zlokalizowanego poniżej ujścia Narwi, to jest właśnie do dolnej Wisły. Numeryczny model rzeki wykonano, używając systemu obliczeniowego HEC-RAS i wykorzystując w tym celu 325 dolinowych przekrojów poprzecznych rzeki.

W artykule autorzy przedstawią i zinterpretują wstępne wyniki obliczeń hydraulicznych w aspekcie wpływu KDW na bezpieczeństwo publiczne w zakresie ochrony przeciwpowodziowej i zabezpieczenia budowli hydrotechnicznych przed uszkodzeniem (podparcie stopni cofką), a także w odniesieniu

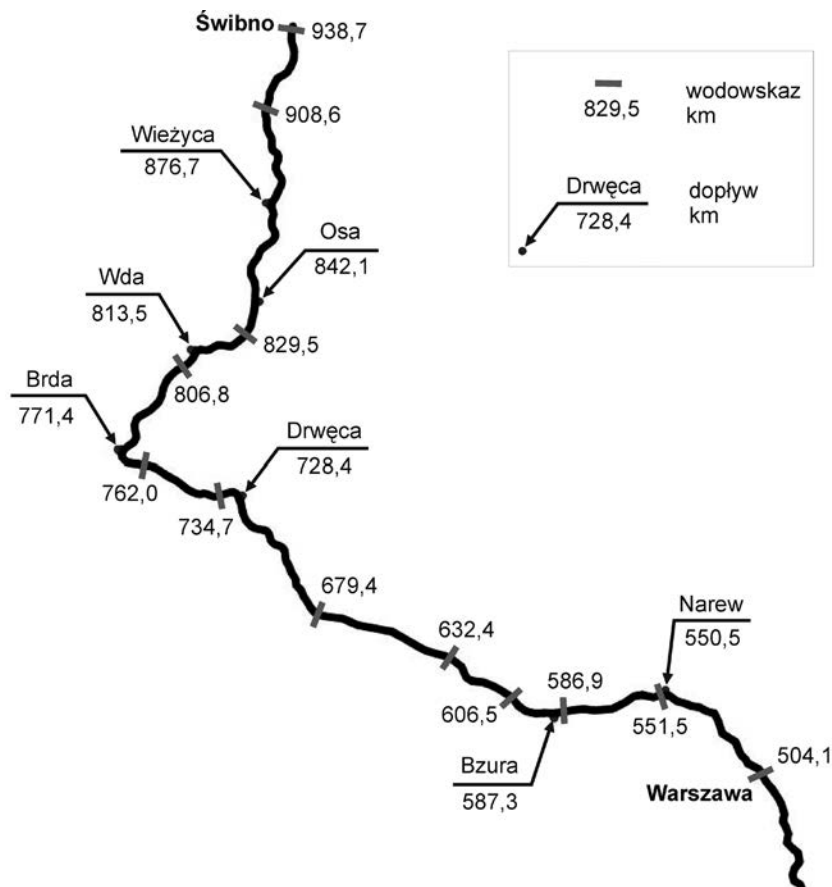
do kwestii utworzenia drogi wodnej klasy międzynarodowej Va i produkcji energii elektrycznej.

### CHARAKTERYSTYKA DOLNEJ WISŁY

Dolna Wisła obejmuje odcinek rzeki o długości 391 km od ujścia Narwi do ujścia Wisły do morza. Powierzchnia dorzecza dolnej Wisły wynosi około 34,3 tys. km<sup>2</sup>. Narew łącznie z dopływem Bugu i Wkry jest największym dopływem Wisły i zasadniczo wpływa na kształtowanie natężenia przepływu w korycie rzeki. Schemat hydrograficzny analizowanego odcinka rzeki przedstawiono na rys. 1.

Analizę hydrauliczną opisaną w artykule przeprowadzono dla odcinka rzeki od Warszawy do Świbna, który ograniczony jest posterunkami wodowskazowymi sieci podstawowej IMGW. Przekrój wodowskazowy Warszawa-Nadwilanówka zlokalizowany jest w 503,5 km biegu rzeki, natomiast przekrój Świbno w 938,7 km (rys. 1). W przekroju Tczew średni przepływ z wielolecia oszacowano na około 1050 m<sup>3</sup>/s, zaś średni roczny odpływ Wisły do Bałtyku wynosi około 34,0 km<sup>3</sup>. Kilometraż rzeki Wisły przyjęto zgodnie z opisem Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Gdańsku [7].

Poniżej ujścia Narwi na całym odcinku od Modlina do Świbna powierzchnia zlewni ulega niewielkiemu przyrostowi pomiędzy poszczególnymi przekrojami, który nie przekracza 5%. Odcinek dolnej Wisły charakteryzuje się rozciągłymi terenami zalewowymi ze zróżnicowaną geometrią przekrojów poprzecznych w postaci licznych wypłyceń i rozgałęzień, co świadczy o procesie wtórnego dziczenia koryta rzeki [6]. Szerokość koryta głównego zmienia się od kilkuset metrów do około 1 km, natomiast rozciągłość terenów zalewowych osiąga wartości do 7 km. Tereny zalewowe są zlokalizowane głównie na lewym brzegu, natomiast prawy wysoki brzeg w górnym biegu dolnej Wisły często wznosi się ponad poziom wielkich wód. Średni spadek dna na rozważanym odcinku zawiera się w granicach od 0,15 do 0,20‰.



Rys. 1. Schemat sieci rzecznej z zaznaczeniem najważniejszych dopływów oraz posterunków wodowskazowych

Większość terenów zalewowych jest chroniona wałami przeciwpowodziowymi. Na odcinku Modlin-Płock koryto główne było częściowo regulowane za pomocą podłużnych i poprzecznych obwałowań [8]. Natomiast na odcinku Płock – Włocławek spiętrzone zwierciadło wody ograniczone jest także zaporami bocznymi w pobliżu stopnia Włocławek.

Na zdecydowanej części obszaru pokrycie terenów zalewowych stanowią lasy, łąki, pastwiska oraz tereny rolnicze, gdzie maksymalna wartość współczynnika szorstkości według Manninga wynosi nawet  $0,12 \text{ s/m}^{1/3}$ . Wysokie wartości tego współczynnika świadczą o złym utrzymaniu terenów zalewowych. Obecny stan utrzymania tych terenów w połączeniu z nieregularnością przekrojów poprzecznych przyczynia się do znacznego zmniejszenia przepustowości koryta rzecznej, co w konsekwencji prowadzi do podwyższenia stanów wody [3].

Wisła uchodzi do morza poniżej Świbna przez utworzony w 1895 roku sztuczny odcinek rzeki, który nosi nazwę Przekopu Wisły. Wykonanie Przekopu miało na celu uproszczenie odpływu Wisły do morza. Poprzedni odpływ Wisły do morza poprzez Wisłę Gdańską i Szkarpawę był bardzo skomplikowany i powodował wiele zagrożeń powodziowych [11]. Końcowy odcinek Wisły od połączenia Nogatu z Wisłą w miejscowości Biała Góra do morza (około 50 km), jest obustronnie obwałowany i nie ma dopływów. Po wykonaniu Przekopu dawną Wisłę Gdańską oraz Szkarpawę odcięto od głównego koryta śluzami żegludowymi w Przelalinie i Gdańskiej Głowie.

Obecnie Wisła od Warszawy do jej ujścia do Zatoki Gdańskiej pod względem żegludowym jest bardzo zróżnicowana.

Według Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 roku w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych (Dz. U. z dnia 18 czerwca 2002 roku) na odcinku od ujścia Sanu (km 280) do zbiornika Włocławek (Płock km 632) Wisła reprezentuje klasę Ib - rzeka zasadniczo nieuregulowana, w korycie liczne łachy, kępy, brzegi często wysokie i urwiste. Na odcinku zbiornika Włocławek do stopnia (km 675) rzeka jest drogą wodną klasy Va. Od stopnia wodnego Włocławek do ujścia Tążyny w miejscowości Silno, gdzie przebiegała granica zaboru pruskiego (km 718) Wisła jest mocno zdegradowana i z trudem spełnia warunki klasy Ib. Od miejscowości Silno do Tczewa (km 909) Wisła była uregulowana i obecnie ma klasę II. W Białej Górze (km 887) jest połączenie z Nogatem, który ma II klasę żegludową. Od Tczewa do ujścia Wisły do Zatoki Gdańskiej (km 941) Wisła ma klasę III. Droga wodna dolnej Wisły była zawsze jednym z podstawowych elementów projektów zabudowy rzeki i miała mieć minimum IV klasę międzynarodową. Obecnie zakłada się, że powinna spełniać warunki drogi wodnej klasy Va.

Dolna Wisła stanowiła zawsze znaczne zagrożenie powodziowe. Według Majewskiego [11] zdecydowana większość powodzi była spowodowana zatorami lodowymi i wywołanymi nimi spiętrzeniami przy stosunkowo niskich przepływach. Jako szczególnie groźne Autor określa pojawiające się kolejno po sobie okresy zlodzenia, a następnie ruszania lodów. W ciągu jednego sezonu zimowego czasami występowały nawet cztery takie okresy. Szczególnie zagrożony powodzią zatorowymi był rejon Żuław Wiślanych, aż do momentu wykonania Przekopu Wisły w 1895 roku, co radykalnie zmniejszyło możliwości two-

zenia się zatorów lodowych. Warunkiem powodzenia tego rozwiązania była regulacja Wisły gwarantująca stabilność koryta i zapewnienie odpowiedniej głębokości do pracy lodołamaczy. Po wykonaniu Przekopu na odcinku delty Wisły, obejmującej Żuławy, nie pojawiło się poważne zagrożenie powodzią zatorową. Utrzymanie tej korzystnej sytuacji wymaga kontrolowania rozwoju stożka usypowego w ujściu do Zatoki Gdańskiej.

Obecnie fale wezbraniowe na dolnej Wiśle transformowane są przez stopień i zbiornik wodny Włocławek. W czasie ostatnich 41 lat zarejestrowano 50 fal powodziowych, które przeszły przez zbiornik włocławski [9], o częstotliwości występowania od 0 do 5 w roku, o czasach trwania od 2 do 36 dób (średnio 7,1 doby) i przepływach od 2420 m<sup>3</sup>/s do 4403 m<sup>3</sup>/s (średnio 2989 m<sup>3</sup>/s), o maksymalnych średniodobowych przepływach od 2435 m<sup>3</sup>/s do 5972 m<sup>3</sup>/s (średnio 3528 m<sup>3</sup>/s) i o całkowitej objętości od 0,418 mld m<sup>3</sup> do 13,695 mld m<sup>3</sup> (średnio 2,017 mld m<sup>3</sup>).

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że zbiornik jest w stanie zredukować do przepływu nieszkodliwego poniżej stopnia fale o czasie trwania od 1 do 3 dni i niewysokiej kulminacji. Natomiast przy falach o przepływie maksymalnym w granicach od 4 do 6 tys. m<sup>3</sup>/s istnieje możliwość zredukowania tego przepływu o około 1000 m<sup>3</sup>/s pod warunkiem posiadania dokładnej prognozy nadchodzącej fali powodziowej oraz odpowiedniego przygotowania zbiornika. Jednocześnie na obszarze przyległym do dolnej Wisły występują najniższe w skali kraju roczne wysokości opadów. Jest to przyczyna największego w Polsce deficytu wody w okresie wegetacyjnym i ma bezpośredni wpływ na efektywność rolnictwa Kujaw i Mazowsza.

Wzdłuż dolnej Wisły zlokalizowanych jest także szereg ośrodków miejskich, takich jak: Płock, Włocławek, Toruń, Bydgoszcz, Grudziądz, Tczew oraz Elbląg i Gdańsk. Dolna Wisła ma również potencjalnie bardzo duże znaczenie żeglugowe, łącząc centrum Polski z portami w Gdańsku i Gdyni. Odcinek dolnej Wisły, poczynając od Bydgoszczy, stanowi międzynarodową drogę wodną E70 łączącą Rotterdam poprzez Berlin, kanał Odra - Havela, Odrę, Wartę, Noteć, Kanał Bydgoski, Wisłę, Nogat i Zalew Wiślany z Kaliningradem. Odcinek dolnej Wisły, Narew i Bug i dalej na terenie Białorusi oraz Ukrainy stanowi fragment międzynarodowej drogi wodnej łączącej Morze Bałtyckie z Morzem Czarnym (droga E40). Dolna Wisła ma również istotne znaczenie hydroenergetyczne, skupiając niemal 50% dostępnego potencjału hydroenergetycznego Polski.

Z przedstawionej charakterystyki dolnej Wisły jednoznacznie wynika, że obecnie odcinek ten nie jest właściwie zagospodarowany, co rodzi pytanie, jaką docelowo rolę rzeki należy upatrywać w gospodarce państwa? Możliwości są dwie: pozostawić rzekę przyrodzie albo prowadzić zrównoważoną gospodarkę wodną, zakładając, że potencjał dolnej Wisły jest istotnym elementem gospodarki narodowej i że chcemy rozsądnie z niego korzystać. Wydaje się, że wobec jasno sformułowanych potrzeb społecznych w odniesieniu do dolnej Wisły, takich jak: zwiększanie bezpieczeństwa w dolinie rzeki, dotyczące zarówno właściwego sposobu eksploatacji stopnia wodnego we Włocławku, jak i ochrony przeciwpowodziowej, potrzeba zwiększenia retencji wody dla rolnictwa, powstanie międzynarodowych dróg wodnych obsługujących polskie porty na Bałtyku, wykorzystanie potencjału energetycznego, czy też zapewnienie stabilnej pracy ujść wody zlokalizowanych wzdłuż rzeki, a także,

co istotne, aktywizacja zawodowa lokalnych społeczności i powstawanie nowych miejsc pracy, zabudowa dolnej Wisły i wykorzystanie jej potencjału gospodarczego stanowi nadrzędny interes publiczny.

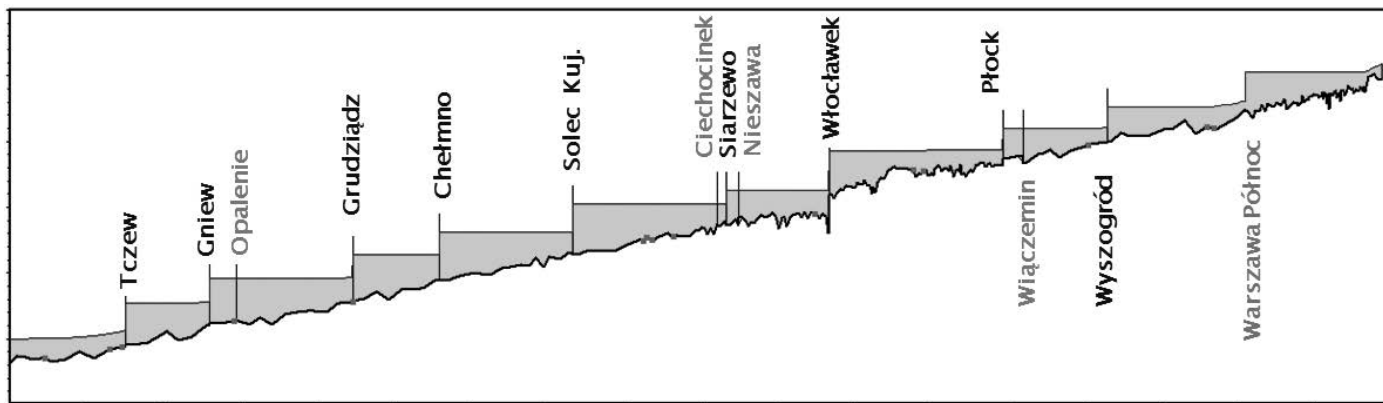
Zgodnie z wiedzą hydrotechniczną wszystkie te postulaty można spełnić, budując na rzece zwartą kaskadę stopni wodnych. W celu oceny idei kaskadyzacji dolnej Wisły wykonano symulacyjne obliczenia hydrauliczne obrazujące wpływ hipotetycznej zabudowy rzeki na warunki przepływu i związane z tym skutki.

## KONCEPCJA KASKADY DOLNEJ WISŁY

Od wielu lat zdawano sobie sprawę z walorów żeglugowych dolnej Wisły, a w okresie międzywojennym zwrócono również uwagę na potencjał hydroenergetyczny tego odcinka rzeki. Po drugiej wojnie światowej powróciła idea energetycznego i żeglugowego wykorzystania dolnej Wisły w postaci kaskady stopni piętrzących (KDW). Pierwsza koncepcja KDW powstała w 1957 roku, jako opracowanie Polskiej Akademii Nauk (PAN) i Hydroprojektu [11]. Z całej kaskady zrealizowano tylko jeden stopień piętrzący – Włocławek, którego budowę zakończono w 1970 roku. KDW miała być zwartym systemem 8 stopni wodnych niskiego spadku ze zbiornikami przepływowymi zrealizowanymi w taki sposób, aby piętrzenie na stopniu niższym sięgało do stanowiska dolnego stopnia wyższego. Przyjęto, że odległości między stopniami będą w granicach od 30 do 50 km. Zakładano, że wszystkie elektrownie będą pracować przepływowo. Podstawową funkcją KDW miała być produkcja energii elektrycznej, którą szacowano w średnim roku hydrologicznym na około 4 200 GWh. Oprócz funkcji energetycznej KDW miała spełniać funkcję żeglugową, tworząc drogę wodną IV klasy międzynarodowej na całym odcinku dolnej Wisły. Oprócz dwóch podstawowych funkcji, energetycznej i żeglugowej, zakładano stworzenie ustabilizowanego układu zwierciadła wody, co miało służyć ujęciom wody do celów komunalnych, przemysłowych i rolniczych, zmniejszeniu zagrożeń powodziowych oraz rozwojowi sportu, turystyki i rekreacji [11]. Ponadto każdy stopień wodny stwarzał dodatkową przeprawę przez Wisłę, co miało istotny wpływ na poprawę infrastruktury komunikacyjnej oraz rozwój gospodarczy regionu. Jednak szczegółowych rozwiązań stopni KDW nigdy nie zatwierdzono i ulegały modyfikacjom w kolejnych pracach studialnych dotyczących zabudowy hydrotechnicznej Wisły (rys. 2).

Ostatnio, w kwietniu 2009 roku firma ENERGA SA złożyła do Ministerstwa Skarbu i Ministerstwa Środowiska deklarację budowy drugiego stopnia na dolnej Wiśle w rejonie Ciechocinka. Stopień ten należy traktować jako drugi element KDW. Interesująca jest analiza wpływu nie tylko tego stopnia na sytuację na dolnej Wiśle, ale całej kaskady. Pozwoli to na ogólniejszy ogląd sytuacji.

W przyjętej do analizy koncepcji KDW założono powstanie na dolnej Wiśle ośmiu nowych stopni piętrzących (rys. 3), tworzących zbiorniki o czasach ograniczonych naturalnymi wysokimi brzegami doliny oraz aktualną linią przebiegu wałów przeciwpowodziowych. Dodatkowo przyjęto, że ze względu na potrzebę utworzenia drogi wodnej do Warszawy powstanie sto-

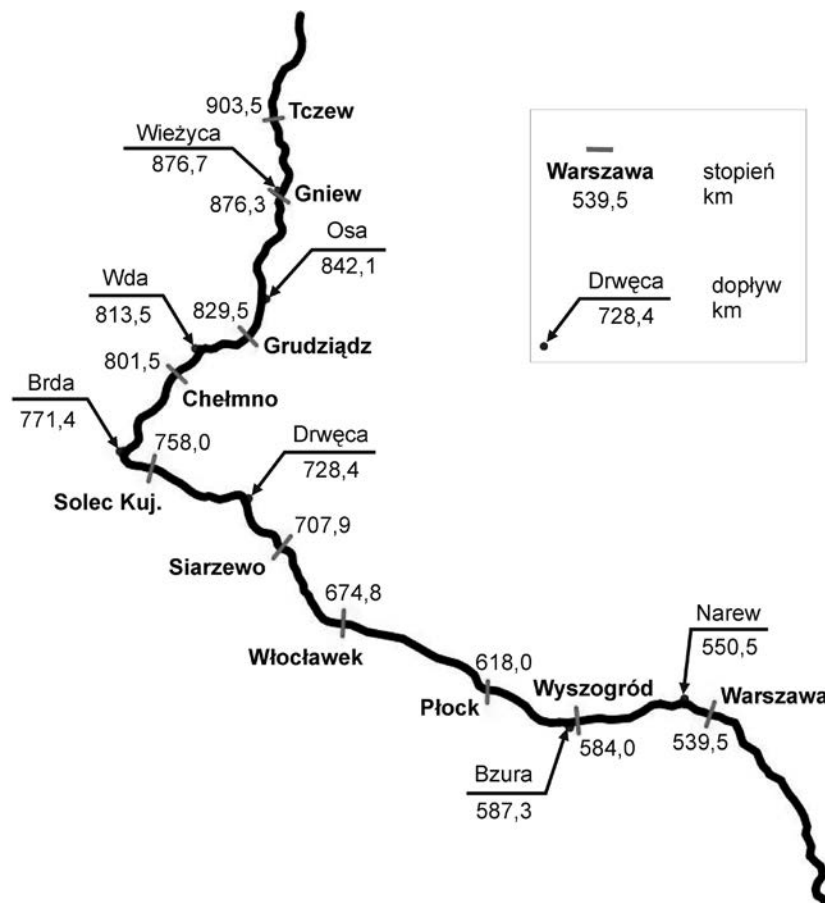


Stopień piętrzący	KDW_1957	KDW_1990	KDW_1999	KDW_2014
	km	km	km	km
Wyszogród	585,500	586,000	584,000	584,000
Wiączęmin			613,200	
Płock	618,000	626,000		618,000
Włocławek	674,800	674,800	674,800	674,800
Nieszawa			703,700	
Siarzewo				707,900
Ciechocinek	713,000	711,000		
Solec Kujawski	759,000	757,800	758,000	758,000
Chełmno	808,000	801,700	801,500	801,500
Grudziądz			829,500	829,500
Opalenie	868,000	864,000		
Gniew			876,300	876,300
Tczew	903,500	904,650		903,500

Rys. 2. Schemat lokalizacji stopni piętrzących w różnych koncepcjach KDW

Tabl. 1. Parametry stopni wodnych w przyjętej do analizy koncepcji KDW

Zapora	Kilometr Wisły [km]	NPP [m n.p.m.]	MaxPP [m n.p.m.]	MinPP [m n.p.m.]	Rzędna zapory [m n.p.m.]	Przęsła			Rzędna progę [m n.p.m.]
						Liczba [-]	Wysokość zamknięcia [m]	Szerokość [m]	
Tczew	903,500	11	12,5	10,5	16,5	15	13,3	24	3,2
Gniew	876,300	18,5	20	18	24	15	13,3	24	10,7
Grudziądz	829,500	25,5	27	25	31	15	13,3	24	17,7
Chełmno	801,500	32,5	34	32	38	15	13,3	24	24,7
Solec Kujawski	758,000	41	42,5	40,5	46,5	15	13,3	24	33,2
Siarzewo	707,900	46	46,5	45,3	50,5	15	12,3	24	38,2
Włocławek	674,850	57,3	58,5	56,5	62,5	10	12	20	50,5
Płock	618,000	64	65,5	63,5	69,5	15	13,3	24	56,2
Wyszogród	584,000	70,5	72	70	76	15	13,3	24	62,7
Warszawa	539,500	81	82,5	80,5	86,5	15	13,3	24	73,2



Rys. 3. Schemat sieci rzecznej z zaznaczeniem stopni wodnych KDW

pień Warszawa (Północ) zlokalizowany powyżej ujścia Narwi. W tabl. 1 zestawiono szczegółowe dane dotyczące lokalizacji i parametrów budowli piętrzących w przyjętej do obliczeń hydraulicznych koncepcji KDW.

Założone sterowanie zamknięciami na budowlach piętrzących odbywało się w obliczeniach hydraulicznych w dwojaki sposób, w zależności od analizowanego przypadku. Dla stanu ustalonego przyjęto stały poziom uniesienia zamknięć pozwalający na utrzymanie na zbiorniku wymaganego poziomu piętrzenia. Natomiast przy analizie przepływów niustalonych sterowanie było zależne dodatkowo od natężenia dopływu do stopnia.

## NUMERYCZNY MODEL RZEKI

Obliczenia hydrauliczne wykonano za pomocą modelu jednowymiarowego HEC-RAS [5], przyjmując warunki przepływu ustalonego dla wybranych przepływów charakterystycznych, bądź warunki przepływu niustalonego w sytuacji odtwarzania transformacji fal wezbraniowych. Model HEC-RAS jest modelem opracowanym przez *U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center*. Model ten jest szeroko używany w Europie i polecany także w Polsce jako podstawowe narzędzie analizy przepływów w kanałach otwartych [10]. Model odwzorowuje przepływ jednowymiarowy w pełnej gamie przypadków, w tym zarówno ruch spokojny, jak i rwący. W obliczeniach przy ruchu ustalonym wykorzystuje się jednowymiarowe równanie

bilansu energii mechanicznej strumienia, gdzie straty energii szacuje się według formuły Manninga. W przypadku ruchu niustalonego jako model matematyczny przepływu wody w rzece wykorzystuje się jednowymiarowe równania de Saint-Venanta. Numeryczne rozwiązanie równań przepływu jest realizowane metodą różnic skończonych z zastosowaniem schematu czteropunktowego (ang. *box scheme* [13]).

Dane potrzebne do uruchomienia obliczeń hydraulicznych w systemie HEC-RAS to przede wszystkim:

- geometria koryta rzeki i budowli hydrotechnicznych,
- współczynniki szorstkości według Manninga we wszystkich przekrojach obliczeniowych,
- natężenie dopływów bocznych,
- natężenie przepływu (lub hydrogram) w przekroju dopływowym (na brzegu górnym) i dodatkowa informacja w przekroju odpływowym (na brzegu dolnym).

Do stworzenia numerycznego modelu rzeki wykorzystano dostępne – zarówno archiwalne, jak i aktualne – dolinowe przekroje rzeki. W przypadku analizowanego odcinka środkowej Wisły (od Warszawy do Włocławka) wykorzystano dane zaczerpnięte z opracowania [12], dokonując ich schematyzacji. Do geometrycznego odwzorowania rzeki na odcinku od Włocławka do Torunia wykorzystano aktualne dane z 2011 roku, pomierzone na potrzeby wykonania opracowania [1b]. Analizie poddano odcinek o długości 59,7 km pomiędzy przekrojem Włocławek w 675,0 km i przekrojem Toruń w km 734,7. Kilometraż rzeki

przyjęto według opisu Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej (RZGW) w Gdańsku. Na rozważanym w opracowaniu [1b] odcinku do obliczeń wytypowano 56 przekrojów poprzecznych korytowych wraz z odpowiednimi przekrojami dolinowymi. Na pozostałym odcinku dolnej Wisły geometrię doliny i koryta rzeki odzwierciedlono za pomocą przekrojów poprzecznych zaczerpniętych z archiwalnego opracowania [7], wykonanego na zlecenie RZGW w Gdańsku przez IMGW. Całość geometrycznego modelu koryta i doliny Wisły na odcinku od Warszawy do ujścia do morza stanowi 325 przekrojów poprzecznych.

W przedstawionej pracy wykorzystano dane pozyskane z opracowania wykonanego przez firmę ARUP na zlecenie Energa SA na potrzeby projektu związanego z zapewnieniem bezpieczeństwa publicznego w rejonie stopnia wodnego Włocławek [1b]. Dane te zawierają informacje dotyczące aktualnych wartości współczynnika szorstkości Manninga koryta głównego oraz terenów zalewowych na odcinku od zbiornika Włocławek do Torunia. Wartości tego parametru wahają się w zakresie  $0,037 \div 0,052 \text{ s/m}^{1/3}$  dla koryta głównego oraz w zakresie  $0,023 \div 0,09 \text{ s/m}^{1/3}$  dla lewego terenu i  $0,035 \div 0,12 \text{ s/m}^{1/3}$  dla prawego terenu zalewowego. Wysokie wartości współczynnika szorstkości, przyjęte na podstawie analizy zdjęć lotniczych i wizji lokalnych, świadczą o złym utrzymaniu terenów zalewowych, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia przepustowości koryta rzeczno-geologicznego. Na pozostałych odcinkach dolnej Wisły w korycie rzeki przyjęto współczynniki szorstkości odpowiednio do charakteru modelowanej rzeki według tablic współ-

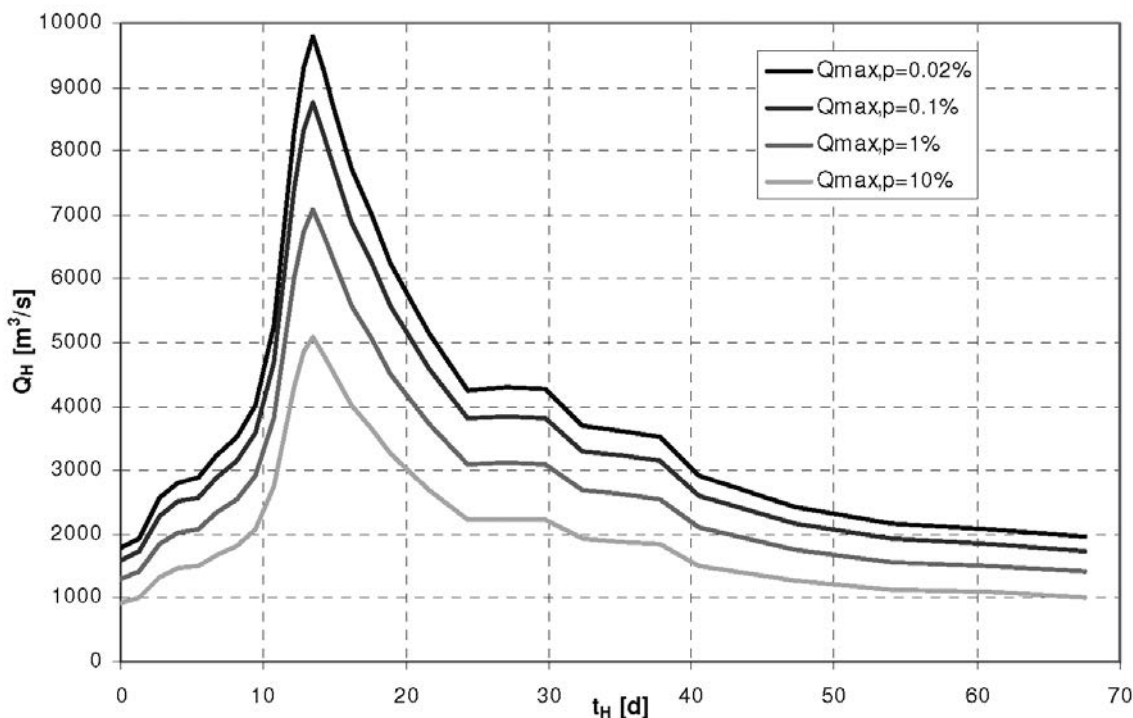
czynnika szorstkości Manninga, dostępnych w literaturze [10]. Ostatecznie obliczenia hydrauliczne związane z transformacją fal wezbraniowych na dolnej Wiśle wykonano do dwóch wariantów pokrycia terenów zalewowych szatą roślinną. W pierwszym wykorzystano średnie wartości współczynnika Manninga na podstawie opracowania [1b]. W drugim wariancie obliczeń w korycie głównym przyjęto aktualne wartości współczynnika, natomiast na lewym i prawym terenie zalewowym założono stałą wartość współczynnika szorstkości  $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$ , co odpowiada terenom dobrze utrzymanym.

Oprócz stopni wodnych w modelu dolnej Wisły uwzględniono przeprawy mostowe. Zabudowa mostowa na przedmiotowym odcinku Wisły (od km 540 do km 941) składa się z 19 obiektów w postaci mostów drogowych, kolejowych oraz drogowo-kolejowych (tabl. 2). Na podstawie informacji uzyskanych od zarządców poszczególnych obiektów (Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oddziały w Gdańsku, Bydgoszczy i Warszawie, Miejskiego Zarządu Dróg w Toruniu i Płocku, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oddziały w Bydgoszczy i Toruniu, Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie) w postaci kart obiektów mostowych oraz rysunków projektowych, wykonano numeryczne odwzorowania każdej z budowli. W ten sposób, w połączeniu z modelami stopni wodnych KDW, stworzono model zabudowy hydrotechnicznej rzeki.

Przebiegi charakterystyczne niezbędne do obliczeń przepływu w warunkach ustalonych wyznaczono w przekrojach wodowskazowych (kontrolowanych), jak również w przekrojach

Tabl. 2. Mosty na Wiśle od km 540 do ujścia do Zatoki Gdańskiej w km 941

Lp.	km Wisły	km w modelu	Most	Długość [m]	Szerokość [m]
1	929+950	11,250	Kiezmark	927,00	13,70
2	908+600	32,600	Tezew (kolejowy)	1051,14	6,80
3	908+570	32,630	Tezew	1051,14	6,80
4	903+900	37,300	Knybawa	985,36	18,60
5	868+200	73,000	Kwidzyn	1217,00	8,00
6	834+050	107,150	Grudziądz	1980,40	12,40
7	827+820	113,380	Grudziądz (w A1)	1971,84	26,00
8	807+800	133,400	Chełmno	1063,00	13,40
9	774+860	166,340	Bydgoszcz	1005,05	16,13
10	735+200	206,000	Toruń (im. Piłsudskiego)	900,00	21,00
11	733+950	207,250	Toruń (kolejowy)	963,30	16,05
12	732+000	209,200	Toruń (im. Zawackiej)	530,00	24,40
13	725+270	215,930	Czerniewice (w A1)	957,40	31,10
14	679+200	262,000	Włocławek	619,20	13,10
15	632+300	308,900	Płock (im. Legionów Piłsudskiego)	680,40	15,00
16	629+350	311,850	Płock (im. Solidarności)	1200,00	27,40
17	587+700	353,500	Wyszogród	1200,00	12,50
18	551+200	390,000	Zakroczym (w S7)	531,00	28,20
19	548+850	392,350	Kazuń	553,00	11,76



Rys. 4. Wyznaczone hydrogramy hipotetycznych fal wezbraniowych odpowiadające przepływowi maksymalnemu o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia

Tabl. 3. Przepływy i stany charakterystyczne Wisły w wybranych przekrojach

km	Przekrój	SSQ [m <sup>3</sup> /s]	SNQ [m <sup>3</sup> /s]	SSW [cm]	SNW [cm]
504,1	Warszawa	549	233	345	238
551,5	Modlin	872	339	405	376
586,9	Wyszogród	886	340	358	326
606,5	Kępa Polska	948	340	272	170
632,4	Płock	942	333	589	545
679,4	Włocławek	911	293	153	66
707,9	Siarzewo	914	313	–	–
734,7	Toruń	983	356	318	179
762,0	Solec Kujawski	986	358	–	–
806,8	Chelmno	1013	382	314	178
835,0	Grudziądz	1027	394	321	180
876,3	Gniew	1037	404	–	–
908,6	Tczew	1046	411	384	223
938,7	Świbno	1080	411	519	458

Tabl. 4. Obliczone przepływy maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w przekroju Kępa Polska

Prawdopodobieństwo przewyższenia P [%]	Przepływ maksymalny Q <sub>max,p</sub> [m <sup>3</sup> /s]
0,02	9793
0,05	9208
0,1	8749
0,5	7615
1	7090
2	6537
5	5750
10	5097
20	4370
30	3893
40	3519
50	3200
60	2912
70	2639
80	2365
90	2069
99	1701

odpowiadających lokalizacji projektowanych stopni wodnych kaskady. Przyjęte oraz obliczone wartości przepływów i stanów charakterystycznych przedstawiono w tabl. 3.

Przepływy maksymalne o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia obliczono do przekroju wodowskazowego Kępa Polska na podstawie 40-letniego ciągu maksymalnych rocznych przepływów WQ z okresu wielolecia 1971-2010 (tabl. 4).

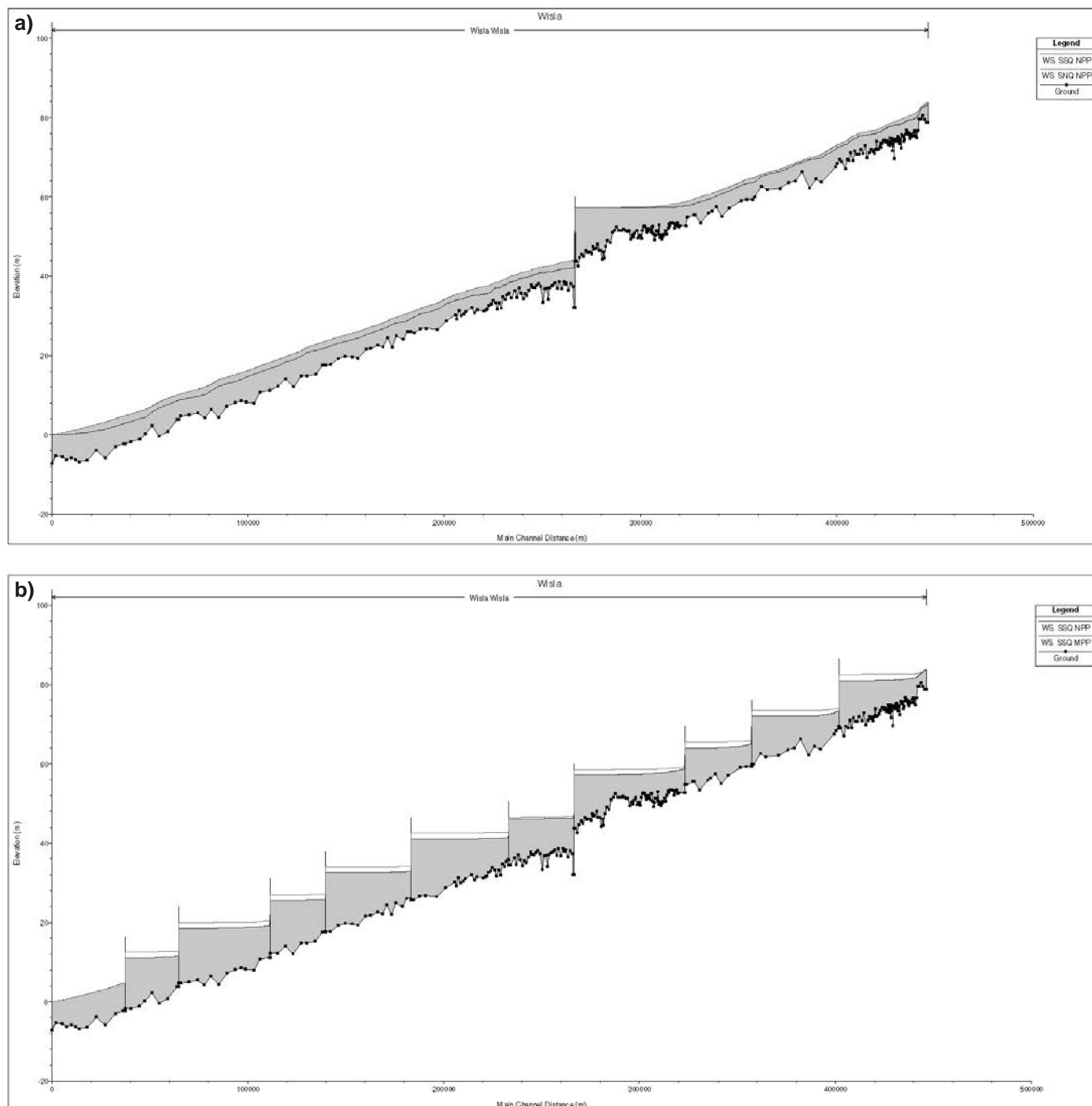
Kształt wykorzystanej w analizie hipotetycznej fali powodziowej wyznaczono metodą Politechniki Warszawskiej [2]. Metoda ta polega na określeniu teoretycznego kształtu typowej fali powodziowej, jaka może wystąpić w danym przekroju

## OBLICZENIA HYDRAULICZNE

wodowskazowym przy przepływie maksymalnym o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia. W zastosowanej metodzie falę hipotetyczną wyznacza się na podstawie zbioru co najmniej sześciu największych fal historycznych. W niniejszym opracowaniu przyjęto sześć fal z okresu 1970-2012, które pojawiły się odpowiednio w roku 1979, 1980, 2001, 2005, 2006 oraz 2010. Fale hipotetyczne wyznaczono w przekroju wodowskazowym Kępa Polska.

Na rys.4 przedstawiono otrzymane hydrogramy hipotetycznych fal wezbraniowych, które wykorzystano w modelu hydrodynamicznym przepływu niestabilnego KDW jako górny warunek brzegowy.

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia hydrauliczne w ustalonych warunkach przepływu do dwóch wariantów zabudowy dolnej Wisły. Obliczenia do stanu obecnego wykonano w celu określenia kształtu profilu zwierciadła wody w przypadku przepływów średnich SSQ oraz SNQ. W obliczeniach uwzględniono stopień wodny Włocławek, na którym utrzymywano normalny poziom piętrzenia NPP. Następnie, w celu określenia wpływu przyjętej zabudowy KDW na warunki przepływu na rozpatrywanym odcinku rzeki Wisły, wykonano symulacje przepływu wody wraz z istniejącą (zabudowa mostowa oraz sto-



Rys. 5. Obliczone profile zwierciadła wody przy obecnym stanie zabudowy rzeki (a) oraz przy przyjętej koncepcji KDW (b)



pień wodny Włocławek) oraz przyjętą (stopnie wodne KDW) zabudową hydrotechniczną. W obliczeniach przyjęto przepływ SSQ oraz piętrzenie na poszczególnych stopniach wodnych na poziomie NPP i MaxPP. Wyniki w postaci uzyskanych profili zwierciadeł wody przedstawiono na rys. 5.

Jak pisze w swojej pracy Granatowicz [4], od ponad 40 lat Włocławek działa jako pojedynczy stopień piętrzący bez przewidzianego w projekcie hydraulicznego podparcia. Taki stan pracy, niezgodny z założeniami przyjętymi w projekcie, powoduje wiele niekorzystnych procesów, takich jak: ciągła erozja dna, która degraduje koryto rzeki poniżej stopnia, obniżenie poziomu wody dolnej, co oznacza wzrost wysokości piętrzenia i w rezultacie przekroczenia dopuszczalnego stanu obciążeń, czy też degradację elementów budowli i niekorzystne zmiany w podłożu. Negatywne skutki braku podparcia hydraulicznego stopnia Włocławek, w postaci znacznego obniżenia rzędnej dna poniżej stopnia w rejonie wyboju, są widoczne dobrze na profilu podłużnym rzeki przedstawionym na rys. 5a. Sytuacja taka oraz wcześniej wymienione procesy w sposób nieunikniony zmniejszają bezpieczeństwo całego obiektu, a za jedyny sposób trwałego zapewnienia bezpieczeństwa stopnia należy uznać budowę stopnia poniżej, który podniesie rzędną zwierciadła wody dolnej do poziomu 46,0 m n.p.m. Podobnie jak w przypadku Włocławka, bezpieczeństwo działania całej KDW zależy od hydraulicznego podparcia każdego ze stopni piętrzących. Jak wykazały obliczenia hydrauliczne (rys. 5b) przyjęte do analizy, parametry KDW gwarantują wzajemne hydrauliczne podparcie poszczególnych stopni, co zapewni bezpieczne warunki eksploatacji poszczególnych stopni.

Istotną kwestią związaną z hydrauliką przepływów na dolnej Wiśle jest postulowany przez Unię Europejską rozwój transportu śródlądowego. W Polsce przewiduje się budowę trzech międzynarodowych dróg wodnych: E30 łączącą Morze Bałtyckie z Dunajem w Bratysławie, E40 łączącą Morze Bałtyckie z Morzem Czarnym oraz E70 stanowiącą europejski szlak komunikacyjny wschód-zachód łączący Kłajpedę z Antwerpią.

Rzekę Wisłę w ramach zadań Unii Europejskiej zakwalifikowano do międzynarodowej drogi wodnej E70. W ramach zagospodarowania polskiego odcinka tej drogi jest wymagane utrzymanie szlaku żeglownego w klasie Va według Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 7 maja 2002 roku w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych (Dz. U. z dnia 18 czerwca 2002 roku). Należy zauważyć, że drogi E40 i E70 mają wspólny odcinek na Wiśle od Gdańska do Bydgoszczy.

Droga wodna o statusie drogi międzynarodowej musi spełniać wymagania stawiane drogami klasy IV, Va lub Vb. Minimalna głębokość tranzytowa drogi wodnej klasy od IV do Vb wynosi 2,80 m. W celu zbadania spełnienia tego warunku na analizowanym odcinku rzeki porównano wyniki obliczeń średniej głębokości w korycie dolnej Wisły przy stanie obecnym ze wspomnianą minimalną głębokością tranzytową, co przedstawiono na rys. 6.

Obliczenia głębokości wykonano do dwóch przepływów charakterystycznych: średniego z wielolecia SSQ oraz średniego niskiego SNQ. Jak widać, przy przepływach średnich głębokości w korycie są większe od minimalnej głębokości tranzytowej na odcinkach poniżej i wzdłuż zbiornika Włocławek. Na odcinku powyżej Włocławka do Warszawy głębokości są zbyt małe, by zapewnić żądaną międzynarodową klasę drogi wodnej. Należy nadmienić, że czas trwania na Wiśle przepływów rzędu SSQ wynosi tylko nieco ponad 100 dni w roku.

W przypadku występowania w rzece przepływów niskich SNQ głębokości przekraczają wartość konieczną dla międzynarodowej drogi wodnej wartość minimalną wyłącznie na odcinku zbiornika Włocławek i w rejonie ujścia rzeki do morza.

Z przedawnionych danych wynika, że minimalnej głębokości tranzytowej drogi wodnej o klasie międzynarodowej, przy niskich i średnich stanach wody panujących na dolnej Wiśle przez większą część roku, nie można zapewnić inaczej jak poprzez kaskadyzację rzeki. W związku z powyższym wykonano obliczenia głębokości do koncepcji KDW i ponownie skonfrontowano je z konieczną głębokością tranzytową (rys. 7). W celu bezpośredniego porównania uzyskanych wyników z sytuacją wcześniejszą, na rysunku powtórzono również wykres głębokości dla SNQ bez uwzględnienia KDW. Obliczenia potwierdziły, że pełna kaskadyzacja rzeki gwarantuje powstanie drogi wodnej o wymaganych parametrach klasy międzynarodowej. Tylko lokalnie obliczona głębokość na odcinku poniżej Warszawy jest mniejsza od 2,8 m, co oznacza, że w przypadku budowy kaskady potrzebne będą miejscowe prace pogłębiarskie, związane z odpowiednim ukształtowaniem dna.

Należy podkreślić, że budowa kaskady dolnej Wisły, czyli przyjętych do obliczeń nowych stopni wodnych: Tczew, Gniew, Grudziądz, Chełmno, Solec Kujawski, Siarzewo, Płock, Wyszogród, umożliwi powstanie drogi E40. W celu połączenia Warszawy z drogą E40 jest konieczne również wybudowanie stopnia Warszawa (Północ).

O klasie drogi wodnej stanowi także prześwit pod budowlami mostowymi. Minimalny prześwit w międzynarodowej klasie V (Va i Vb) wynosi 5,25 m (Dz. U. z dnia 18 czerwca 2002 roku). Zabudowa dolnej Wisły, zgodnie z przyjętą koncepcją KDW, spowoduje zmiany w położeniu zwierciadła wód pod zabudową mostową. W większości przypadków minimalny prześwit, w stosunku do warunków przepływu przy NPP na wszystkich stopniach wodnych KDW, nie będzie mniejszy niż 5,25 m. Warunku tego nie spełnią 3 obiekty: nowy most autostradowy w Grudziądzu (km 827,82) z prześwitem 3,91 m, most w Bydgoszczy (km 774,86) z prześwitem 3,45 m oraz most im. Piłsudskiego w Toruniu (km 735,2) z prześwitem 0,21 m. Spełnienie wymogów klasy Va w stosunku do prześwitu pod tymi mostami będzie wymagało przebudowy tych obiektów (dotyczy to mostów w Toruniu i Bydgoszczy) lub zmiany lokalizacji stopnia wodnego w Grudziądzu, który w przyjętej koncepcji jest zlokalizowany około 1,6 km poniżej mostu na autostradzie A1.

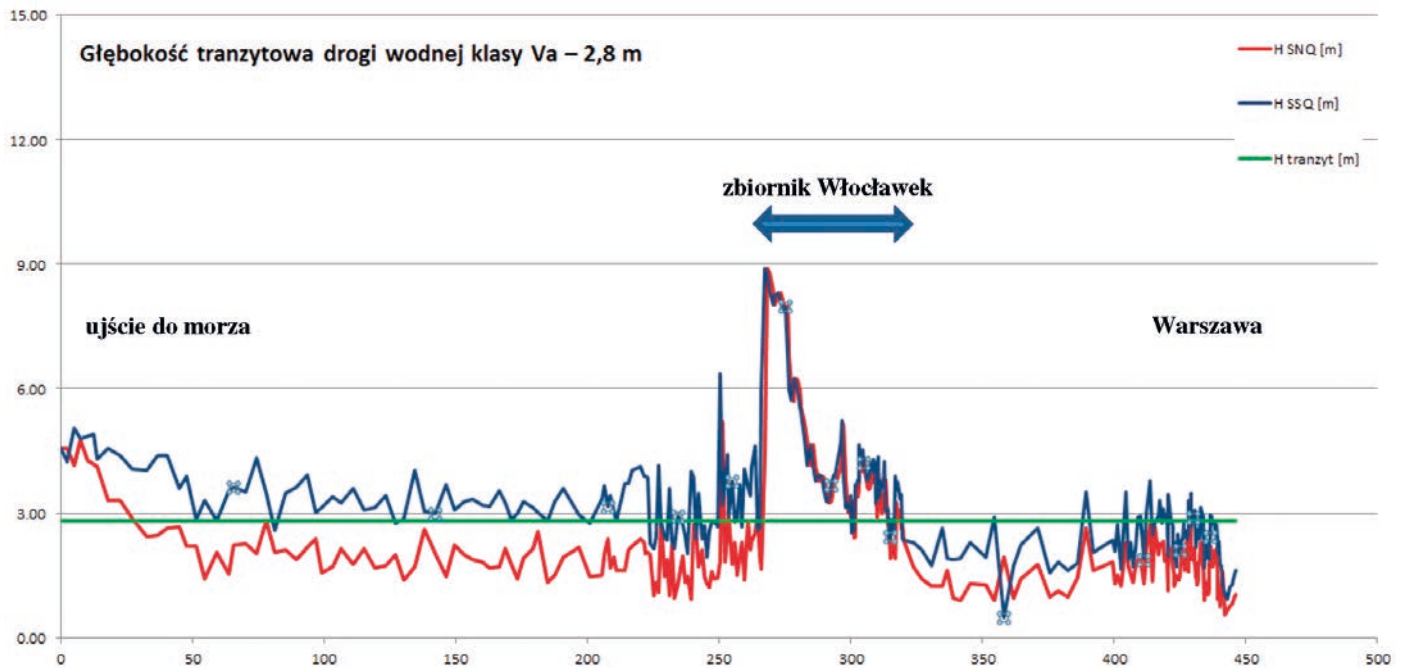
W celu określenia potencjału hydroenergetycznego KDW obliczono do poszczególnych stopni kaskady maksymalną i minimalną moc elektrowni, jak również średnią roczną produkcję energii. Podstawą obliczeń były wyznaczone krzywe sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi wyznaczone dla roku przeciętnego oraz odpowiadające im wartości spadów elektrowni wraz z ich czasami trwania.

Moc elektrowni wyznaczono na podstawie następującej relacji:

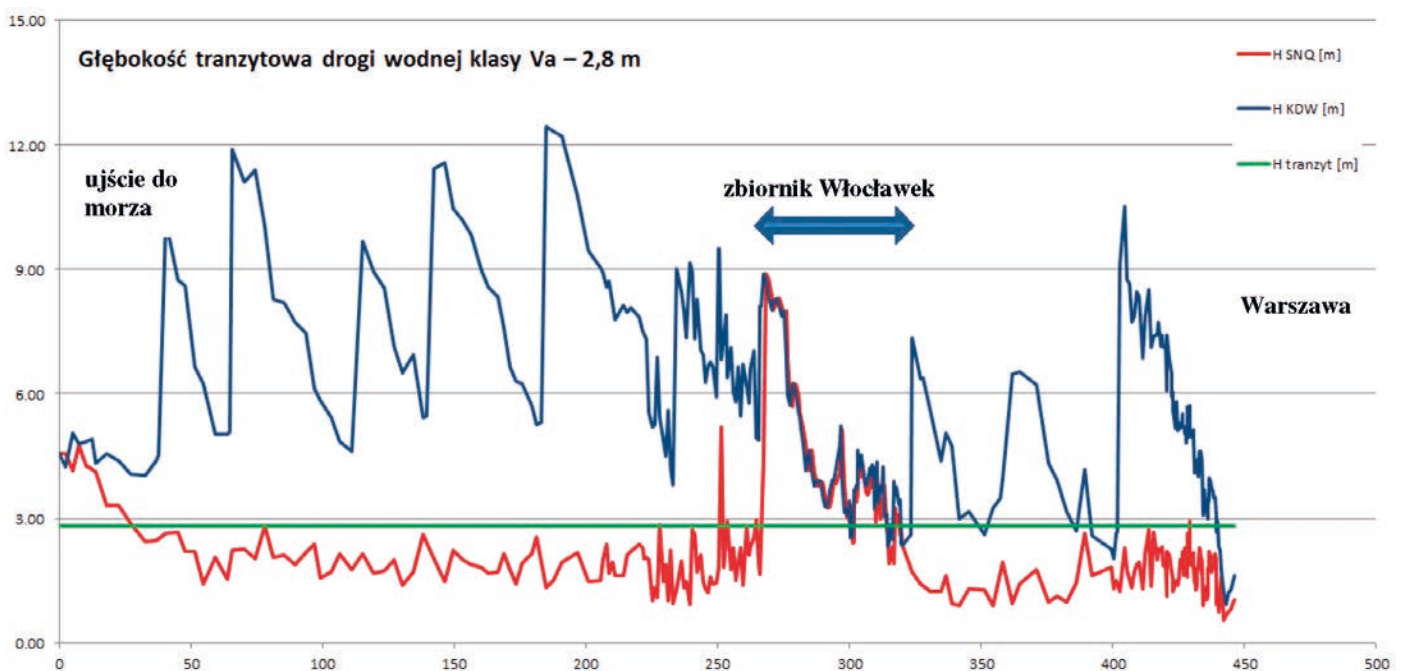
$$P = 9,81 \cdot \eta \cdot Q_e \cdot H_n \quad (1)$$

gdzie:

- $P$  – moc elektrowni [kW],
- $\eta$  – sprawność całkowita elektrowni [–],
- $H_n$  – spad netto (spad efektywny) [m],
- $Q_e$  – przepływ przez elektrownię [m<sup>3</sup>/s].



Rys. 6. Średnia głębokość koryta Wisły obliczona dla stanu istniejącego



Rys. 7. Średnia głębokość koryta Wisły obliczona do koncepcji KDW

Sprawność całkowita elektrowni wynika, m.in. ze sprawności turbiny, sprawności generatora oraz sprawności transformatora. W opracowaniu przyjęto, że całkowita sprawność każdej projektowanej elektrowni jest stała i wynosi  $\eta = 0,875$  [1c].

Spad netto  $H_n$ , jest spadem brutto  $H_b$  pomniejszonym o wysokość strat hydraulicznych  $H_{str}$  powstałych podczas przepływu przez układ elektrowni:

$$H_n = H_b - H_{str} \quad (2)$$

W pracy przyjęto za opracowaniem [1a] stałą wartość całkowitych strat hydraulicznych wynoszącą  $H_{str} = 0,1$  m. Spad elektrowni brutto wyznaczono jako różnicę rzędnej zwierciadła wody górnej  $R_{WG}$  oraz rzędnej wody dolnej  $R_{WD}$  poniżej stopnia:

$$H_b = R_{WG} - R_{WD} \quad (3)$$

Rzędna zwierciadła wody górnej odpowiada przyjętej rzędnej normalnego poziomu NPP na danym stopniu, natomiast rzędna zwierciadła wody dolnej wyznaczono przy danym natężeniu przepływu przy wykorzystaniu modelu hydrodynamicznego

KDW. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w warunkach ruchu ustalonego do kolejno zmieniających się przepływów z zakresu od 300 m<sup>3</sup>/s do 2800 m<sup>3</sup>/s.

Przepływ przez elektrownię  $Q_e$  wyznaczono jako różnicę przepływu o określonym czasie trwania  $Q_d$  i przepływu niewykorzystanego przez elektrownię  $Q_0$ , który obejmuje przepływ przez służę żeglugową oraz przez przepławkę dla ryb:

$$Q_e = Q_d - Q_0 \quad (4)$$

W opracowaniu przyjęto stałą wartość przepływu niewykorzystanego przez elektrownię  $Q_0 = 50$  m<sup>3</sup>/s [1c]. Obliczenia mocy elektrowni oraz produkcji energii wykonano w czterech wariantach maksymalnego przepływu przez elektrownię (przełyku instalowanego)  $Q_{e,max}$ , który odpowiadał przepływowi o określonym czasie trwania:

$Q_{e,max} = 900$  m<sup>3</sup>/s – odpowiada przepływowi z zakresu  $Q_{135} - Q_{170}$ ,

$Q_{e,max} = 1200$  m<sup>3</sup>/s – odpowiada przepływowi z zakresu  $Q_{75} - Q_{90}$ ,

$Q_{e,max} = 1500$  m<sup>3</sup>/s – odpowiada przepływowi z zakresu  $Q_{50} - Q_{60}$ ,

$Q_{e,max} = 1800$  m<sup>3</sup>/s – odpowiada przepływowi z zakresu  $Q_{25} - Q_{35}$ .

Średnią roczną produkcję energii wyznaczono na podstawie następującej formuły:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N (P_i \cdot 24\Delta t_i) \quad (5)$$

gdzie:

$E$  – średnia roczna produkcja energii [GWh],

$E_i$  – cząstkowa produkcja energii wyznaczona w przedziale czasu  $\Delta t_i$ ,

$P_i$  – moc elektrowni przy danym przepływie oraz spadzie elektrowni [GW],

$\Delta t_i$  – przedział czasowy [dni],

$N$  – liczba przedziałów czasowych.

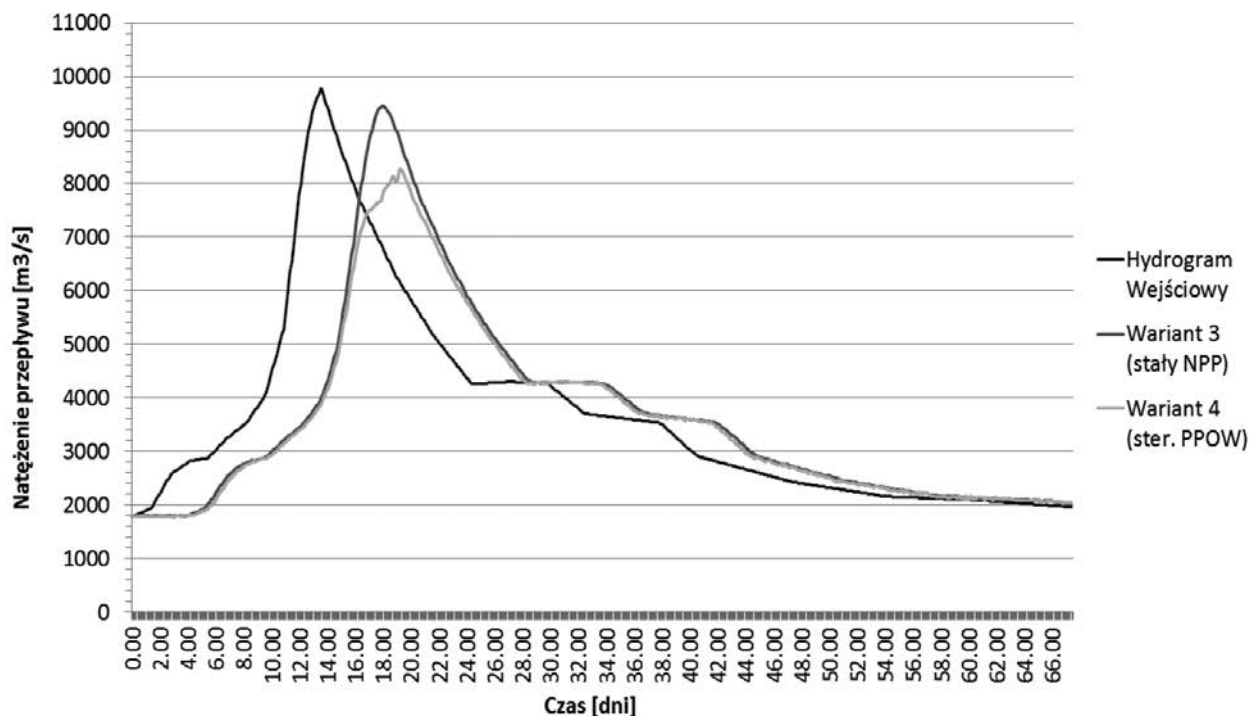
W tabl. 5 zestawiono całkowite wartości mocy i produkcji energii KDW odpowiadające przyjętym przepływowi  $Q_{e,max}$ . Jak

Tabl. 5. Zestawienie mocy i rocznej produkcji energii KDW dla różnych wariantów maksymalnego przepływu przez elektrownię  $Q_{e,max}$

Przepływ elektrowni $Q_{e,max}$ [m <sup>3</sup> /s]	Moc minimalna $P_{min}$ [MW]	Moc maksymalna $P_{max}$ [MW]	Produkcja energii $E$ [GWh]
900	140,8	455,8	3160,0
1200	140,8	571,6	3559,1
1500	140,8	684,5	3795,1
1800	140,8	776,4	3929,7

widać, największa całkowita moc maksymalna KDW na poziomie 776,40 MW występuje w przypadku przepływu przez elektrownię  $Q_{e,max} = 1800$  m<sup>3</sup>/s. Natomiast odpowiadająca temu przepływowi średnia roczna produkcja energii całej kaskady wynosi 3929,7 GWh.

Budowa KDW, w wariantcie przedstawionym w niniejszej pracy, oznacza powstanie ośmiu nowych zbiorników retencyjnych, co w połączeniu z właściwym sterowaniem pracą stopni w trakcie przejścia fal wezbraniowych da znaczący efekt redukcji kulminacji fali, a tym samym obniży stopień zagrożenia powodzią doliny Wisły. Wniosek ten potwierdzono wynikami modelowania przepływów ustalonych oraz transformacji fal wezbraniowych. Należy podkreślić, że budowa pełnej KDW, przy założeniach przyjętych w pracy, spowoduje powstanie stałej retencji przeciwpowodziowej o wartości rzędu 520 mln m<sup>3</sup>. Całkowitą retencję powodziową w dynamicznych warunkach przejścia fali wezbraniowej oszacowano na około 710 mln m<sup>3</sup>. Chociaż w relacji do całkowitych objętości największych fal wezbraniowych, liczonych w mld m<sup>3</sup>, nie jest to wartość gwarantująca całkowite przejście każdej fali, to jednak redukcje kulminacji fal przekraczające 1000 m<sup>3</sup>/s (rys. 7) i związane z nimi



Rys. 8. Zestawienie hydrografów dla fali o prawdopodobieństwie  $p = 0,02\%$

obniżenia rzędnych zwierciadła przekraczające poniżej ostatniego stopnia (Tczew) nawet 1 m przy odpowiednim sterowaniu przepływem na poszczególnych stopniach wodnych zapewnią znaczne zwiększenie stopnia ochrony doliny przed powodzią. Na rys. 8 przedstawiono przykładową redukcję kulminacji fali wezbraniowej o najniższym analizowanym prawdopodobieństwie 0,02% poniżej najniższego stopnia KDW w Tczewie w relacji do hydrogramu dopływowego w Kępie Polskiej (rys. 8, hydrogram wejściowy) w dwóch wariantach. W pierwszym założono brak sterowania odpływem na poszczególnych stopniach i utrzymanie możliwe długo NPP na zbiornikach kaskady (rys. 8, wariant 3), zaś w drugim przyjęto realizację sterowania odpływem maksymalizującego redukcję szczytu fali na każdym ze zbiorników (rys. 8, wariant 4).

Dodatkowo należy stwierdzić, że przyjęte do obliczeń hydraulicznych parametry stopni piętrzących nie ograniczają przepustowości doliny rzeki w przypadku przejścia wysokich wód, co pozwala na przeprowadzanie każdej z fal wezbraniowych bez zwiększania zagrożenia powodziowego.

## HYDRAULICZNE SKUTKI KDW

### Bezpieczeństwo stopnia Włocławek

Stopień wodny Włocławek wybudowany w latach 1962-1970 funkcjonuje samodzielnie jako jedyny element planowanej kaskady dolnej Wisły, czyli stopień bez podparcia w postaci jakiegokolwiek zbiornika wyrównawczego. Jest to kuriozalna sytuacja niespotykana w praktyce hydrotechnicznej. Jej konsekwencją było uruchomienie intensywnych procesów erozyjnych poniżej stopnia Włocławek powodujących systematyczne obniżania dna Wisły. Obniżenie to obejmuje aktualnie stosunkowo długi odcinek rzeki i wynosi od ponad 3,50 m tuż poniżej stopnia Włocławek do około 0,50 m w odległym o 60 km Toruniu. Ustabilizowanie sytuacji w korycie Wisły i przywrócenie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa stopnia Włocławek może być osiągnięte jedynie poprzez budowę stopnia wodnego poniżej Włocławka, czyli kolejnego stopnia kaskady.

### Ochrona przed powodzią doliny dolnej Wisły

Budowa kaskady to powstanie dodatkowych zbiorników retencyjnych. Z wykonanych obliczeń wynika, że nawet jeśli ich pojemności będą znacznie mniejsze od pojemności zbiornika Włocławek, to i tak łączny wpływ całej kaskady przy właściwym sterowaniu pracą stopni w trakcie przejścia fali wezbraniowej da znaczący efekt redukcji kulminacji fali, a tym samym obniży stopień zagrożenia doliny Wisły powodzią. Ponadto istnienie zbiorników wyeliminuje aktualnie najbardziej prawdopodobną przyczynę ewentualnych powodzi, za którą uważa się zatory lodowe. Z drugiej strony wybudowanie towarzyszących zbiornikom zapór bocznych i wałów oraz właściwe przygotowanie czasz zbiorników zwiększy przepustowość koryta w stopniu zapewniającym bezpieczne przejście największych spodziewanych fal wezbraniowych.

## Dolna Wisła jako wodna droga śródlądowa

Dolna Wisła stanowi fragment drogi wodnej E40, która powinna łączyć Morze Czarne z Bałtykiem, a także drogi wodnej E70 łączącej Morze Północne z Bałtykiem. Ich parametry techniczne powinny spełniać wymagania stawiane drodze wodnej kategorii Va. Aby spełnić wymagania co do głębokości jest, konieczne podpiętrzenie rzeki. Wykonane symulacje wykazały, że przy przepływach niskich dolna Wisła nigdy nie będzie drogą kategorii Va zaś przy przepływach średnich spełni je tylko przez krótką część roku, natomiast kaskada zapewni wymagane parametry w sposób trwały. Z tych samych obliczeń wynika, że minimalny prześwit pomiędzy zwierciadłem wody w rzece a spodem istniejących konstrukcji mostowych będzie wymagał skorygowania lokalizacji wybranych stopni kaskady, a także podniesienia niektórych konstrukcji mostowych.

## Dolna Wisła jako źródło energii elektrycznej

Z budową stopnia wodnego wiąże się zawsze możliwość wykorzystania wytworzonej różnicy poziomów wody górnej i dolnej do ewentualnej produkcji energii elektrycznej. W tym przypadku celowość budowy elektrowni wodnej wydaje się oczywista. Biorąc pod uwagę elektrownię Włocławek (moc 160 MW), jej znaczenie w krajowym systemie energetycznym i efekty ekonomiczne, należy oczekiwać również znaczących korzyści wynikających z produkcji energii elektrycznej na innych stopniach kaskady. To uzasadnione przypuszczenie potwierdzają wykonane analizy, z których wynika, że zależnie od panujących warunków hydrologicznych łączna moc zainstalowana na stopniach kaskady może wynosić od ponad 455 MW do niemal 780 MW, umożliwiając produkcję energii dochodzącą do 3930 GWh rocznie.

## Retencja zbiornikowa i zaopatrzenie w wodę

Budowa kaskady dolnej Wisły umożliwi retencjonowanie wody. Przy założeniu, że planowane zbiorniki mieszczą się w obrębie istniejących wałów i zboczy doliny, ich łączna pojemność wyniesie około 1,2 mld m<sup>3</sup>. Odnosząc tę wartość do całkowitej retencji zbiornikowej w Polsce wynoszącej 3,7 mld m<sup>3</sup> i należącej do najniższych w Europie, widać, że budowa kaskady znacząco poprawi możliwości retencjonowania wody.

Warto dodać, że kaskada dolnej Wisły pozwoli na zaspokojenie potrzeb wodnych przyległych regionów o najniższych opadach atmosferycznych w Polsce. Zapotrzebowanie na wodę rolnictwa i przemysłu można zaspokoić, wykorzystując wodę zretencjonowaną w zbiornikach kaskady. Pobór wody z ujęć musi mieć charakter stabilny, a to mogą zagwarantować zbiorniki kaskady, w których poziom wody jest kontrolowany.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono wybrane wyniki analizy warunków hydraulicznych na dolnej Wiśle, która obejmuje odcinek

rzeki od ujścia Narwi do Zatoki Gdańskiej. Rozpatrzono warunki przepływów ustalonych oraz nieustalonych, przyjmując dwa podstawowe scenariusze: przepływy w warunkach istniejącej zabudowy tzn., gdy istnieje tylko stopień Włocławek oraz przepływy w warunkach istnienia hipotetycznej kaskady stopni wodnych składającej się z 8 nowych stopni oraz istniejącego już stopnia Włocławek.

Celem analizy było sprawdzenie, czy i w jakim stopniu na wymienionym odcinku Wisły aktualnie są spełnione wymagania związane z bezpieczeństwem stopnia Włocławek oraz jej ewentualnym wykorzystaniem do celów żeglugi śródlądowej, ochrony przed powodzią, produkcji energii elektrycznej i zaopatrzenia w wodę przy zachowaniu aktualnego stanu zabudowy hydrotechnicznej oraz w warunkach istnienia kaskady stopni wodnych. Podstawą analizy są wyniki symulacji komputerowych przepływów wykonanych do danych opisujących koryto rzeki oraz charakterystyk hydrologicznych rzeki opracowanych na podstawie obserwacji historycznych. Otrzymane wyniki uzasadniają sformułowanie następującego ogólnego wniosku: **kompleksowe wykorzystanie różnorodności możliwości dolnej Wisły jest możliwe tylko dzięki budowie tzw. pełnej kaskady stopni wodnych, w której zapory usytuowane szeregowo wzdłuż biegu rzeki podpiętrzają odcinkami jej wody do takiego poziomu, że zwierciadło wody zbiornika poniżej dochodzi do zapory poprzedniej.**

Podsumowując, wykonane obliczenia hydrauliczne i przeprowadzone na podstawie ich wyników analizy dostarczyły ogólnych wiarygodnych informacji o charakterze ilościowym na temat różnych aspektów potencjału dolnej Wisły. Wynikające z nich wnioski wykazują, że kaskada dolnej Wisły jest jedynym rozwiązaniem technicznym, które z jednej strony umożliwia kompleksowe wykorzystanie potencjału tego odcinka rzeki zaś z drugiej ogranicza generowane na nim zagrożenia.

#### LITERATURA

1. ARUP: Zapewnienie bezpieczeństwa publicznego w rejonie stopnia Włocławek przy wykorzystaniu energii wody oraz poprawie potencjału ekosystemów wodnych i od wód zależnych, raport opracowany na zlecenie Energa SA:

[a]. Operat hydrologiczny (2011), [b]. Model hydrodynamiczny odcinka Dolnej Wisły (2011), [c]. Operat hydroenergetyczny (2011), [d]. Obliczenia hydrauliczne (2012), [e]. Koncepcje programowo-przestrzenne. Stopień wodny Siarzewo II (2013).

2. Gądek W.: Wyznaczenie wezbrań hipotetycznych metodą Politechniki Warszawskiej i metodą Politechniki Krakowskiej w zlewniach kontrolowanych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, zeszyt 23, 2013.

3. Gąsiorowski D., Szydłowski M.: Wpływ stanu utrzymania terenów zalewowych Wisły na poziomy wysokich wód na odcinku od Włocławka do Torunia. Acta Energetica nr 3/16, 2013.

4. Granatowicz J.: Następny stopień na Wiśle poniżej Włocławka. Acta Energetica nr 3/16, 2013.

5. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Davis 1997.

6. Hydroprojekt: Budowa stopnia wodnego w Ciechocinku-Nieszawie. Koncepcja programowo-przestrzenna. Część I, Warszawa 2002.

7. IMGW Gdynia/Poznań: Wyznaczenie granic bezpośredniego zagrożenia powodzią w celu uzasadnionego odtworzenia terenów zalewowych – Wisła, Opracowanie na zlecenie RZGW Gdańsk, 2003/2004.

8. IMGW: Określenie warunków przejścia wielkich wód w rzekach regionu Wisły Środkowej z uwzględnieniem wielkości przepływów charakterystycznych w profilu Zawichost, Warszawa, 2012.

9. Kosiński J.: Ochrona przeciwpowodziowa na dolnej Wiśle, Acta Energetica, nr 2/15, 2013.

10. Kubrak J., Nachlik E.: Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych, Warszawa 2003.

11. Majewski W.: Wykorzystanie dolnej Wisły do celów energetycznych i żeglugowych. 2Pi Group, Gdańsk, sierpień 2011.

12. Neokart GIS: Integrated Engineering, BlomInfo, Studium dla potrzeb planów ochrony przeciwpowodziowej. Etap III. Opracowanie na zlecenie RZGW Warszawa, 2006.

13. Szymkiewicz R.: Matematyczne modelowanie przepływów w rzekach i kanałach. Warszawa, 2000.

**PODZIĘKOWANIE:** Autorzy artykułu składają podziękowanie firmie ENERGA Invest S.A. za udostępnienie danych, dotyczących między innymi koncepcji stopnia wodnego Siarzewo, niezbędnych do wykonania niniejszej pracy.