



Zachodniopomorski
Uniwersytet
Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Budownictwa
i Architektury



Katedra
Budownictwa
Wodnego

Autoreferat pracy doktorskiej

Wpływ udrożnienia kanałów Międzyodrza i remontu
zabudowy hydrotechnicznej na przepływy w sieci dolnej
Odry.

mgr inż. Robert Mańko

promotor: dr hab. Ryszard Ewertowski

1. Wyjaśnienie tematu rozprawy doktorskiej

W rozprawie doktorskiej została przeprowadzona analiza mająca na celu określenie stopnia wrażliwości poszczególnych odcinków rzek w sieci rzecznej dolnej Odry od węzła Widuchowa do ujścia Regalicy przed jeziorem Dąbie i przekroju na Odrze Puckiej na zmiany hydrauliczne obszaru Międzyodrza wywołane bagrowaniem wyselekcjonowanych kanałów oraz remontem i modernizacją zabudowy hydrotechnicznej. Na podstawie przeprowadzonych symulacji została wykonana szczegółowa analiza określająca stopień zmian w rozdziałach przepływów między poszczególnymi odcinkami sieci oraz została przeprowadzona analiza stwierdzająca o potrzebie (lub nie) przeprowadzenia prac renowacyjnych pod kątem zmian w rozdziałach przepływów.

2. Uzasadnienie wyboru problematyki badawczej

Kandydat od wielu lat prowadzi badania z zakresu hydrauliki koryt otwartych, dlatego wybór zagadnień z tego właśnie zakresu jest wyborem oczywistym, lecz wybór Międzyodrza jako poligonu badawczego ma swoje podwójne uzasadnienie. Z jednej strony jest to swoista kontynuacja badań Katedry Budownictwa Wodnego, a z drugiej strony jest to odpowiedź na dzisiejsze problemy powodziowe w rejonie dolnej Odry i przymorza zachodniego. W ramach swoich prac Zachodniopomorski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Szczecinie (ZZMiUW) opracował szereg działań inwestycyjnych do realizacji celu ograniczenia ryzyka powodziowego na obszarze swojej jurysdykcji. Jedną z planowanych inwestycji jest inwestycja pn. „Przywrócenie walorów przyrodniczych Doliny Dolnej Odry poprzez poprawę zdolności retencyjnych i przeciwpowodziowych Międzyodrza”, w ramach której przewiduje się udroźnienie kanałów Międzyodrza, odbudowę budowli hydrotechnicznych, ubezpieczenie grobli oraz wykonanie kładek nad budowlami. Jak podaje ZZMiUW do realizacji zadania niezbędne jest wykonanie modelu hydrologiczno-przyrodniczego .

Problematyka wezbrań rzecznych i wezbrań sztormowych oraz ochrona przeciwpowodziowa obszarów przy ujściach rzek od wielu lat stanowi przedmiot zainteresowań hydrologów. Procesy kształtowania się rzędnych zwierciadła wody w ujściowych odcinkach rzek są problemami bardzo złożonymi, które nie posiadają jednoznacznych rozwiązań matematycznych. Rzędne zwierciadła wody na tych obszarach zdeterminowane są od wielu czynników, np. wartości przepływów, wpływu morza oraz warunków wiatrowych, między którymi nie istnieją ścisłe związki. Obecnie najskuteczniejszym narzędziem opisującym i prognozującym przepływy wód w korytach otwartych są modele matematyczne. Szczególnym przykładem jest obszar dolnej Odry na odcinku Gozdowice – Roztoka Odrzańska. Obszar ten jest niezwykle skomplikowany pod względem hydrograficznym. Gęsta sieć rzeczna o strukturze pierścieniowej, obszar Międzyodrza oraz występowanie jeziora Dąbie powodują, że obszar ten dla hydrologów jest wyjątkowo interesującym obiektem badawczym. Międzyodrze, poprzez dewastację zabudowy hydrotechnicznej aktualnie pełni jedynie funkcje obwałowanego terenu zalewowego, który istotnie wpływa na warunki hydrauliczne sieci

dolnej Odry. Charakterystyczną cechą koryt rzecznych dolnej Odry są duże głębokości i bardzo małe spadki zwierciadła wody. Problem przepływów w sieci dolnej Odry od wielu lat stanowił główny nurt badawczy Instytutu Morskiego oddział Szczecin (rozwiązany w 2008 r.) oraz Katedry Budownictwa Wodnego Politechniki Szczecińskiej (od 2012 r. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie). Pierwsze kompleksowe pomiary przepływów wód w kanałach sieci dolnej Odry z użyciem nowoczesnego sprzętu zostały przeprowadzone w latach 2009 - 2010 przez Kurnatowskiego [2011]. Pomimo wielu prowadzonych badań w sieci dolnej Odry, nie przeprowadzono jakichkolwiek pomiarów przepływów wód w kanałach Międzyodrza. Wszelkie badania na Międzyodrzu ograniczały się jedynie do badań jakościowych wody. Badania terenowe przeprowadzone przez autora pracy polegały na wykonaniu punktowych pomiarów głębokości w wybranych kanałach Międzyodrza. W związku z powyższym autor postanowił przeanalizować wpływ Międzyodrza na wartości rozptyłów w sieci dolnej Odry.

3. Opis stanu badań w zakresie tematyki objętej rozprawą doktorską

Ogólna charakterystyka dolnej Odry.

W klasycznej rzece można wyróżnić trzy etapy biegu rzeki: bieg górny, środkowy i dolny. Podział na powyższe odcinki dokonuje się na podstawie zachodzących procesów korytotwórczych. Dolny bieg rzeki charakteryzuje się mniejszym spadkiem dna, mniejszą erozją denną oraz większą akumulacją rumowiska. Modelowym przykładem trójpodziału rzeki w polskich warunkach jest Odra. Zgodnie z powyższym Odrę można podzielić na trzy charakterystyczne odcinki:

- Górna Odra
- Środkowa Odra
- Dolna Odra

Odra ma swoje źródła w Górach Odrzańskich w Czechach. Długość rzeki od źródła do ujścia wynosi 854 km z tego 742 km w Polsce, zaś powierzchnia zlewni wynosi prawie 120 tys. km² w tym 106 tys. km² na terenie Polski. W zależności od przyjętych kryteriów badawczych pojęcie „dolnej Odry” jest niejednoznaczne. Na przestrzeni lat opracowano 4 kryteria według których definiuje się obszar dolnej Odry.

- Kryterium hydrologiczne: Dolna Odra oznacza odcinek od Roztoki Odrzańskiej na wysokości Trzebieży do przekroju wodowskazowego w Gozdowicach będącemu już poza wpływem cofki morskiej.
- Kryterium geograficzne: Dolna Odra zaczyna się od ujścia Warty a kończy w Jeziorze Dąbie.
- Kryterium hydrograficzne: Przez określenie dolna Odra uważa się odcinek Odry od Warty do Roztoki Odrzańskiej

- Kryterium żeglugowe: Za dolną Odrą rozumie się odcinek od Zatoni Górnej (Kanał Odra-Havela) do Mostu Długiego w Szczecinie i jeziora Dąbie.

Buchholz [1990, 1991] oraz Kowalewska-Kalkowska [2012] przytaczają termin obszar wodny ujścia Odry, w którym można wyróżnić:

Sieć rzeczną obejmującą odcinek Odry od Gozdowic do Roztoki Odrzańskiej na wysokości Trzebieży wraz z jeziorem Dąbie

- Zalew Szczeciński
- Cieśniny morskie przez które Odra wpływa do Bałtyku:
 - Dziwna
 - Świna
 - Piana

W odniesieniu do terminu obszar wodny ujścia Odry bardzo często używa się terminu estuarium (łac. Aestuarium – droga morska). Według definicji Pritcharda [1967] estuarium nazwiemy pół zamkniętym obszarem wodnym mającym otwarte połączenie z morzem w którym wody morskie są rozcieńczone z wodą pochodzącą ze spływu powierzchniowego. Inną definicję przytacza Jasińska [1991, 1992] definiując estuarium jako rejon ujściowy rzeki w którym dochodzi do wzajemnego oddziaływania wód słodkich i morskich. Jeszcze w innych źródłach estuarium oznacza ujściowy odcinek rzeki ograniczony granicą wód morskich i podlegający działaniom pływów. Osadczuk i in. [2007] sprzeciwiają się używaniu terminu estuarium z geologicznego punktu widzenia. Buchholz [1990,1991] rejon ujścia Odry nazywa Odrzańskim Obszarem Estuariowym.

W ujęciu Majewskiego [1972] w ujściu Odry (w zależności od górnej i dolnej granicy) można wyróżnić trzy typy estuariów:

- Estuarium I rzędu – Zatoka Pomorska
- Estuarium II rzędu – Zatoka Greifswaldzka i Zalew Szczeciński wraz z Zatoką Achterwasser i Jeziorem Wrzosowskim
- Estuarium III rzędu – Jezioro Dąbie mające połączenie z Zalewem Szczecińskim (poprzez Iński Nurt, Odrę Zachodnią i Roztokę Odrzańską) .

Charakterystyka Międzyodrza.

Międzyodrziem nazywamy obszar ograniczony Odrą Wschodnią i Odrą Zachodnią od węzła w Widuchowej do Ińskiego Nurtu. W południowej części obszaru Międzyodrza (tj. od węzła w Widuchowej do Kanału Leśnego) zlokalizowany jest (od 1 kwietnia 1993 r.) Park Krajobrazowy Doliny Dolnej Odry (PKDDO) będący obszarem o szczególnych walorach przyrodniczych i kulturowych. PKDDO jest unikatowym w skali europejskiej zbiorowiskiem torfowisk i mokradeł.

W wyniku drugiej wojny światowej wiele obiektów hydrotechnicznych Międzyodrza uległo uszkodzeniom, które dopiero w lata sześćdziesiątych ubiegłego wieku zostały odbudowane, a teren Międzyodrza znów był wykorzystywany rolniczo. Z uwagi na rosnące koszty eksploatacyjne budowli i urządzeń hydrotechnicznych rolnictwo na tym terenie stało się całkowicie nieopłacalne. Brak konserwacji urządzeń hydrotechnicznych oraz nadzoru nad nimi spowodował ponowne zniszczenie większości tych obiektów. Od tego momentu nastąpiła prawie całkowita naturalizacja oraz sukcesja ekologiczna. Z uwagi na zabagnienie większości terenu Międzyodrza obszar ten stał się słabo, a miejscami całkowicie niedostępny dla człowieka. Z uwagi na liczne zdewastowania kanały i urządzenia hydrotechniczne Międzyodrza nie spełniają aktualnie żadnych funkcji regulacyjnych. Pomimo obecnego stanu Międzyodrza, który wyróżnia się na tle Europy (i prawdopodobnie Świata) pod względem prezentowanych walorów przyrodniczych należy pamiętać i niejednokrotnie podkreślać, że za obecny stan odpowiada człowiek, a właściwie sytuacja polityczna w latach 60 i 70 XX wieku, która pozwoliła na degradację i naturalizację tego obszaru.

Poldery

Cechą charakterystyczną Międzyodrza na obszarze od węzła Widuchowa do Kanału Klucz-Ustowo jest występowanie w nim polderów, czyli płaskich obszarów przeznaczonych do zalania w okresie jesienno-zimowym, nieznacznie wzniesione ponad stan średni wody w rzece. Rzędne polderów wynoszą od ok. 0.00 do 0.40 m n.p.m. Międzyodrze w sposób sztuczny podzielono pod względem hydrograficznym na trzy niezależne od siebie poldery:

W tabelach 1 oraz 2 zestawiono szczegółowe informacje o polderach Międzyodrza zawierające informacje o powierzchni polderu, powierzchni cieków oraz średnie rzędne terenu.

Poldery Międzyodrza

LP	Nazwa polderu	Powierzchnia polderu[ha]	Powierzchnia cieków [ha]	Średnia wysokość [m n.p.m.]
1	Widuchowski	2 465.44	348.5	0.10
2	Gryfiński	2 232.32	135.0	0.20-0.30
3	Szczeciński	758.64	137.3	0.20-0.30

Topografia polderów Międzyodrza

Wysokość [m n.p.m.]	Polder Widuchowski		Polder Gryfiński		Polder Szczeciński	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]
-0.2 ÷ -0.1	333.78	13.53				
- 0.1 ÷ 0.0	323.36	13.11				
0.0 ÷ 0.1	257.01	10.42	164.22	7.36		
0.1 ÷ 0.2	1088.62	44.12	654.11	29.30		
0.2 ÷ 0.3	240.22	9.74	1384.25	62.01	718.75	94.74
0.3 ÷ 0.4	90.92	3.68	26.63	1.19	39.89	5.26
0.4 ÷ 0.5	71.52	2.90	3.11	0.14		
0.5 ÷ 0.6	15.28	0.62				
0.6 ÷ 0.7	6.43	0.26				
0.7 ÷ 0.8	6.03	0.24				
0.8 ÷ 0.9	6.03	0.24				
0.9 ÷ 1.0	6.03	0.24				
powyżej 1,0	22.21	0.90				
	2467.44		2232.32		758.64	

Budowle hydrotechniczne na Międzyodrzu

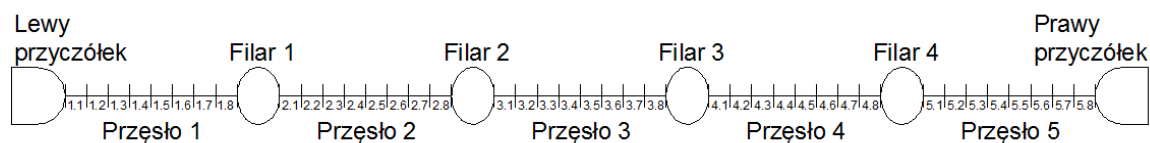
Dla prowadzenia właściwej gospodarki wodą na obszarze Międzyodrza wykonano 35 budowli hydrotechnicznych:

- 18 śluz komorowo-gospodarczych,
- 2 śluzy komorowo-żeglugowe,
- 6 przewalów (przelewów wałowych),
- 5 przepustów wałowych,
- 4 stacje pomp.

Jaz Widuchowa

Projekt „Dla polepszenia odpływu na dolnej Odrze” zakładał budowę w korycie Odry Zachodniej jazu stałego. Ostatecznie po zmianach zaprojektowano i w 1914 r. wybudowano jaz ruchomy (zastawkowy), co umożliwiło regulacją rozdziałem wód na węźle Widuchowa. Jaz usytuowany jest na początku Odry Zachodniej (100 m od rozwidlenia). Głównym zadaniem jazu jest kontrolowanie rozdziałem przepływu na węźle Widuchowa. Na rysunku 1 przedstawiono schemat części przelewowej jazu Widuchowa.

Jaz Widuchowa – Schemat przęseł



Opis hydrologiczny obszaru Międzyodrza

Ujściowy odcinek Odry w ujęciu hydrologicznym zaliczyć można do najbardziej skomplikowanych odcinków sieci rzecznych w Polsce. Procesy hydrologiczne są wynikiem wzajemnych oddziaływań:

- stanów wód na Zalewie Szczecińskim i w morzu (cofka),
- przepływów w rzekach i kanałach,
- działalności wiatrów i zmian ciśnienia,
- skomplikowanego układu hydrograficznego na odcinku Widuchowa – Trzebież,
- dużej retencyjności w postaci istnienia przepływowego jeziora Dąbie,
- ustawicznej działalności człowieka,
- krótkookresowych spiężeń anemobarycznych, pływów morskich i sejszy

W sieci dolnej Odry można wyróżnić sześć przekrojów wodowskazowych z których obserwacje można wykorzystywać do analiz statystycznych. Obserwacje na tych wodowskazach prowadzi Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) nieprzerwanie od kilkudziesięciu lat. W tabeli zestawiono przepływy i stany charakterystyczne, okres czasu dla którego przeprowadzono analizę statystyczną, rzędną zera wodowskazu a także opis lokalizacji wodowskazu.

Charakterystyczne stany i przepływy w sieci dolnej Odry na odcinku Trzebież-Gozdowice

Wodowskaz	Lokalizacja	Rzędna zera [m nad Kr]	Okres statystyczny	Wartości charakterystyczne				
				NNQ	SNQ	SSQ	SWQ	WWQ
Przepływy charakterystyczne:								
Gozdowice	km 645,3. Wodowskaz znajduje się w wolnym profilu naprzeciw nadzoru wodnego w Gozdowicach	3.020	1959 – 2007	158	252	535	1251	3180
Stany charakterystyczne				NNW	SNW	SSW	SWW	WWW
Gozdowice	j.w.	j.w.	j.w.	144	208	322	492	659
Bielinek	km 672,5. Wodowskaz znajduje się na prawym brzegu Odry	-1.095	1954 – 2007	147	209	333	532	754

Wodowskaz	Lokalizacja	Rzędna zera [m nad Kr]	Okres statystyczny	Wartości charakterystyczne				
Widuchowa	km 701,8. Wodowskaz znajduje się na prawym brzegu Odry na wolnym profilu	-5.157	1949 – 2007	440	479	545	652	771
Gryfino	km 718,5. Wodowskaz znajduje się na prawym brzegu Odry Wschodniej na wolnym profilu.	-5.106	1952 – 2007	440	466	523	601	685
Podjuchy	Km 734. Wodowskaz znajduje się na prawym brzegu Odry Wschodniej na wolnym profilu	-5.107	1993 – 2007	442	474	524	598	628
Most Długi w Szczecinie	km 740,1. Wodowskaz przymocowany jest do prawego przyczółka Mostu Długiego od strony wody górnej	-5.123	1959 - 2000	433	459	512	587	622
Trzebież	km 770,3. Wodowskaz zlokalizowany jest w północnej części basenu portu rybackiego.	-5.080	1949 - 2000	429	456	510	583	614

Matematyczny opis zjawiska

Przepływy w rzekach i kanałach charakteryzują się dominacją składowej wektora prędkości równoległej do osi kanału, co w większości przypadków uzasadnia potraktowanie zjawiska przepływów w sposób jednowymiarowy. W literaturze spotkać można dwie metody wyprowadzenia równań zachowania pędu i masy do opisu jednowymiarowego. Pierwsza metoda polega na uproszczeniu równań Reynoldsa (równania Naviera-Stokesa uśrednione w czasie prędkości i ciśnienia). W drugiej metodzie wyprowadzenie opiera się na zasadach zachowania ciągłości i pędu. Dybkowska [1994] w dodatku B swojej pracy zaprezentowała wyprowadzenie równań nieustalonego przepływu ruchu jednowymiarowego.

Do podstawowych założeń pozwalającym na uzyskanie formuł ruchu jednowymiarowego należą [3,5,6]:

- ruch wody jest wolnozmienny,
- zmiany zwierciadła wody są małe – pochodne drugiego rzędu można pominąć,
- przepływ jest jednowymiarowy – niezmiennosc parametrów przepływu w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny z , uzyskując zerowe składowe wektora prędkości u_y , u_z .
- rozkład prędkości w pionie jest równomierny,

- zakrzywienia linii prądu są małe – pionowe przyśpieszenia dążą do zera, zakłada się hydrostatyczny rozkład ciśnienia,
- spadek dna kanału jest niewielki,
- jedyną siłą masową jest siła ciężkości,
- brak naprężeń wiatrowych,

Stosując się do powyższych założeń po przekształceniach uzyskuje się tzw. równania Saint Venanta:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q |Q| n^2 g}{R_H^{4/3} A} = 0$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Warunki graniczne

Warunki graniczne stanowią dodatkową paczkę informacji umożliwiające poprawne sformułowanie problemu i jego rozwiązania. Warunki te dzielą się na:

- warunki brzegowe,
- warunki początkowe.

Warunki brzegowe stanowią w pewnym sensie rozwiązanie równań różniczkowych, bowiem na wejściu zawierają informację o wartości funkcji na brzegach modelu. Prawidłowy wybór warunków brzegowych stanowi istotny problem dla prawidłowego funkcjonowania każdego modelu.

Warunki brzegowe podzielić można na 3 grupy:

- górne warunki brzegowe,
- dolne warunki brzegowe,
- środkowe warunki brzegowe (warunki ciągłości w węzłach).

Górne warunki brzegowe dla sieci rzecznych określa się dla górnych końców wszystkich odcinków, które nie są połączone w żadnym węźle. W obliczeniach hydraulicznych górne warunki brzegowe mogą przyjmować postać:

- hydrogramu przepływu – $f[Q(t)]$,
- hydrogramu stanu – $f[W(t)]$,
- mieszaną: hydrogram przepływu + hydrogram stanu – $f[Q(t), W(t)]$.

Analogicznie jak górne warunki brzegowe, dolne warunki są wymagane w dolnych końcach odcinków, które nie są zgrupowane w węzłach. Dolne warunki brzegowe definiowane mogą być identycznie jak górne warunki oraz przez:

- głębokość normalną, obliczaną na podstawie równania Chezy-Manninga przy zadeklarowanym średnim spadku dna koryta,
- krzywą konsumcyjną.

Środkowe warunki brzegowe określane również jako wewnętrzne mają za zadanie zachowanie warunków ciągłości w węzłach:

- warunek ciągłości przepływu:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0$$

gdzie:

N – ilość odcinków schodzących do węzła,

Q_i – wartość przepływu w odcinku (wartość przepływu jest dodatnia przy przepływie do węzła, zaś ujemna od węzła).

- warunek ciągłości poziomemu zwierciadła wody. Wartości stanów wód na końcach wszystkich odcinków schodzących w węzle są takie same.

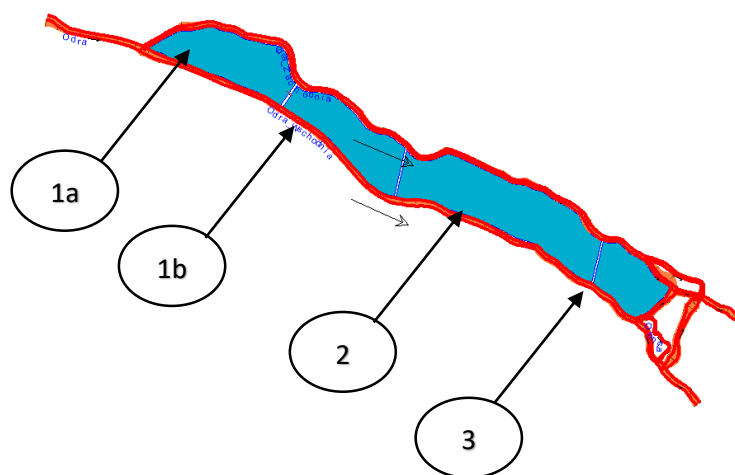
4. Zakres badawczy

Zakres pracy obejmuję analizę literatury w zakresie hydrauliki koryt otwartych przy szczególnym zwróceniu uwagi na hydraulikę sieci o strukturze pierścieniowej. W ramach podstawowych badań wykonano kilka sesji pomiarowych na terenie Międzyodrza w celu określenia średnich głębokości wybranych odcinków kanałów. Zebrane informacje posłużyły do oszacowania parametrów kanałów po wykonaniu bagrowania. W pracy przyjęto trapezowe przekroje poprzeczne Międzyodrza, co z racji ich ilości oraz zdecydowanie mniejszych szerokości i głębokości od np. Skońnicy ma swoje uzasadnienie. Przygotowana baza danych z przekrojami poprzecznymi, zarówno kanałów Międzyodrza jak i odcinków rzek sklasyfikowanych w MPHP (Mapa Hydrograficznego Podziału Polski) pozwoli na zbudowanie modelu matematycznego wybranego fragmentu obszaru sieci dolnej Odry. W ramach obliczeń zostały przygotowane 3 warianty sieci dolnej Odry:

Wariant 0.

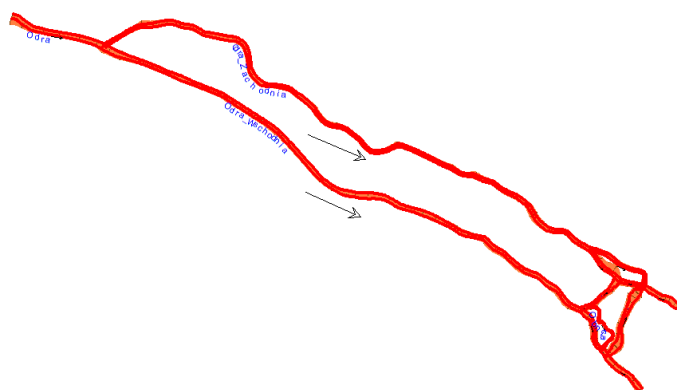
Pierwszy analizowany wariant zakłada możliwość wykorzystania retencyjnego obszaru Międzyodrza. Wariant ten jest zmodyfikowaną wersją Wariantu 1 (w dalszej części) rozszerzoną o 3 poldery Międzyodrza. Wymiana wód między polderami a Odrą Wschodnią i Zachodnią odbywa się za pomocą całkowicie otwartych

wszystkich urządzeń hydrotechnicznych. Ze względu na smukłość polderu Widuchowskiego, polder ten został podzielony na dwa osobne współpracujące ze sobą poldery: Polder 1a – polder Widuchowski część południowa, polder 1b – polder Widuchowski część północna. Poldery 2 i 3 zaznaczone na rysunku poniżej i oznaczają odpowiednio polder Gryfiński i Szczeciński. Ze względu na zły stan kanałów Międzyodrza, można uznać, że wariant ten przedstawia sytuację aktualną.



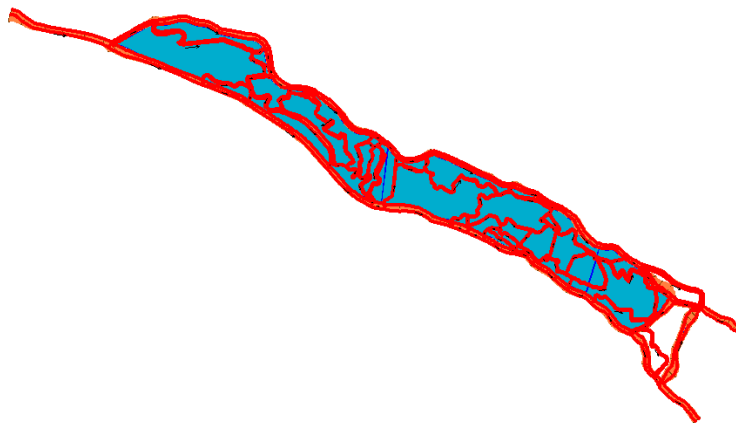
Wariant 1.

Wariant ten zawarty jest na odcinku dolnej Odry od Widuchowej do Regalicy i „Odry Puckiej”. Wariant ten uwzględnia zdolności do retencjonowania wody przez poszczególne poldery Międzyodrza. Ideą tego wariantu jest zamknięcie wszystkich urządzeń hydrotechnicznych, w taki sposób, aby całkowicie wyłączyć ten obszar z przepływu wód.



Wariant 2.

Wariant 2 jest ostatnim z przygotowanych wariantów sieci dolnej Odry. Jako pierwszy z powstałych do chwili obecnej modeli dolnej Odry uwzględnia możliwość swobodnego przepływu przez kanały Międzyodrza.



W ramach prac przygotowano zestaw warunków brzegowych modelu (scenariuszy hydrologicznych) z zakresu ruchu ustalonego jak i nieustalonego, które będą tożsame dla wszystkich 3 wariantów sieci dolnej Odry.

5. Uszczegółowiony przedmiot badań.

Przedmiotem rozprawy będzie opracowanie modelu numerycznego sieci dolnej Odry w trzech wariantach obliczeniowych. Obliczenia przeprowadzone zarówno dla ruchu ustalonego jak i nieustalonego, wraz ze wcześniejszą kalibracją modelu posłużą do oszacowania wpływu zmiany warunków hydraulicznych Międzyodrza na wartości rozptyłów wód w sieci dolnej Odry.

6. Cele rozprawy doktorskiej

W ramach głównego celu pracy zaplanowano przeprowadzenie symulacji numerycznych w dwóch dużych grupach: analizie ruchu ustalonego i nieustalonego. W analizie ruchu ustalonego wyodrębniono 4 pośrednie cele pracy. Pierwszym pośrednim celem pracy jest określenie wrażliwości wartości przepływów w wybranych profilach na zmiany wartości przepływu w Odrze przed rozdziałem w Widuchowej oraz określenie stopnia wrażliwości na zmiany rzędnej zwierciadła wody w ujściach modelu, wywołane m.in. wahaniami morza. Ocenę wrażliwości przeprowadzono dla każdego zbudowanego wariantu modelu. Drugim i trzecim pośrednim celem jest analiza zmian przepływu w zależności od zastosowanego modelu oraz wpływu stopnia otwarcia jazu. Ostatni pośredni cel polega na określeniu stopnia wrażliwości poszczególnych odcinków sieci na zmiany wartości współczynnika szorstkości. W grupie ruchu nieustalonego jako pierwszy cel zaplanowano symulację przepływu wód hydrogramów przepływów w wybranych przekrojach sieci dla trzech przypadków:

- Wezbranie rzeczne,
- Wezbranie morskie,
- Jednoczesne wystąpienie wezbrania rzecznoego z morskim.

Za drugi, pośredni cel pracy postawiono analizę zmian hydrogramów przepływu dla wybranych przekrojów kontrolnych w zależności od zastosowanego wariantu, współczynnika szorstkości i stopnia otwarcia jazu.

7. Teza rozprawy doktorskiej

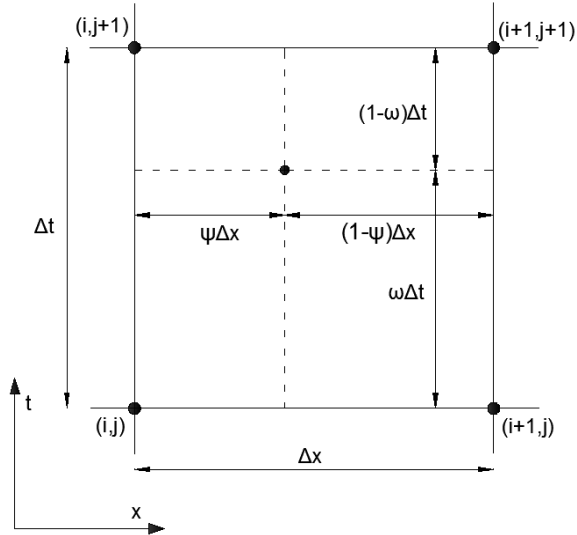
„Istnieje możliwość zbadania relacji w przepływach w kanałach sieci dolnej Odry przy zastosowaniu jednowymiarowego modelu przepływu wód i określenia wpływu na te relacje zmian warunków hydraulicznych obszaru Międzyodrza, wywołanych potencjalnym bagrowaniem wybranych kanałów oraz remontem zabudowy hydrotechnicznej. Analiza symulacji przepływu wód przez obszar sieci dolnej Odry w jej trzech wariantach pozwoli na określenie stopnia wrażliwości poszczególnych kanałów i cieków wywołane zmianą parametrów hydraulicznych obszaru Międzyodrza.”

8. Zastosowane metody i/lub narzędzia badawcze

Zastosowany na potrzeby pracy program Hec-Ras pozwala na modelowanie przepływu wód w sposób jedno oraz dwuwymiarowy. Hec-Ras zawiera cztery jednowymiarowe moduły obliczeniowe:

- ruch ustalony,
- ruch nieustalony,
- ruch rumowiska,
- jakość wody.

Program Hec-Ras rozwiązuje równania różniczkowe stosując metodę różnic skończonych przy zastosowaniu czteropunktowego schematu Preissmana. Ze zdyskretyzowanego obszaru rozwiązania w postaci siatki węzłów czasoprzestrzennej wybiera się pojedyncze oczko (rysunek poniżej) o wymiarach $\Delta t \times \Delta x$, w środku którego dla dowolnego punktu P wykonuje się aproksymację równań różniczkowych. Położenie punktu jest zdefiniowane przez wartości współczynników numerycznych ψ – waga przestrzenna oraz ω – waga czasowa.



Dla powyższego schematu formuły aproksymacyjne pochodnych względem przestrzeni i czasu mają postać:

$$f_p(x, t) \approx \psi[\omega f_j^{i+1} + (1 - \omega)f_j^i] + (1 - \psi)[\omega f_{j+1}^{i+1} + (1 - \omega)f_{j+1}^i] \quad (23)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx (1 - \omega) \frac{f_{j+1}^i - f_j^i}{\Delta x_j} + \omega \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_j^{i+1}}{\Delta x_j} \quad (24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \psi \frac{f_{j+1}^i - f_j^i}{\Delta t_i} + (1 - \psi) \frac{f_{j+1}^{i+1} - f_j^{i+1}}{\Delta t_i} \quad (25)$$

gdzie:

f_j^i – wartość funkcji w j-tym przekroju w i-tej chwili czasowej,

i, i+1 –chwile czasowe przy kroku czasowym Δt ,

j, j+1 – numery kolejnych przekrojów przy kroku przestrzennym Δx .

Stosując schemat Preissmanna poszczególne człony równania Saint Venanta po aproksymacji przedstawiono w tabelach poniżej.

Aproksymowane człony równania ciągłości schematem czteropunktowym

Człon równania	Aproksymowana postać
$\frac{\partial A}{\partial t}$	$\frac{\psi}{\Delta t_i} (A_{j+1}^i - A_j^i) + \frac{1 - \psi}{\Delta t_i} (A_{j+1}^{i+1} - A_j^{i+1})$
$\frac{\partial S}{\partial t}$	$\frac{\psi}{\Delta t_i} (S_{j+1}^i - S_j^i) + \frac{1 - \psi}{\Delta t_i} (S_{j+1}^{i+1} - S_j^{i+1})$
$\frac{\partial Q}{\partial x}$	$\frac{1 - \omega}{\Delta x_j} (Q_{j+1}^i - Q_j^i) + \frac{\omega}{\Delta x_j} (Q_{j+1}^{i+1} - Q_j^{i+1})$

Aproksymowane człony równania pędu schematem czteropunktowym

Człon równania	Aproksymowana postać
$\frac{\partial Q}{\partial t}$	$\frac{\psi}{\Delta t_i}(Q_{j+1}^i - Q_j^i) + \frac{1-\psi}{\Delta t_i}(Q_{j+1}^{i+1} - Q_j^{i+1})$
$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)$	$\frac{1-\omega}{\Delta x_j} \left[\left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{j+1}^i - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_j^i \right] + \frac{\omega}{\Delta x_j} \left[\left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{j+1}^{i+1} - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_j^{i+1} \right]$
gA	$g\psi[\omega A_{j+1}^{i+1} + (1-\omega)A_j^i] + g(1-\psi)[\omega A_{j+1}^{i+1} + (1-\omega)A_{j+1}^i]$
$\frac{\partial z}{\partial x}$	$\frac{1-\omega}{\Delta x_j}(z_{j+1}^i - z_j^i) + \frac{\omega}{\Delta x_j}(z_{j+1}^{i+1} - z_j^{i+1})$
$\left(\frac{Q Q n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)$	$\psi \left[\omega \left(\frac{Q Q n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_j^{i+1} + (1-\omega) \left(\frac{Q Q n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_j^i \right] + (1-\psi) \left[\omega \left(\frac{Q Q n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_{j+1}^{i+1} + (1-\omega) \left(\frac{Q Q n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_{j+1}^i \right]$
$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)$	$\frac{1-\omega}{\Delta x_j} \left[\left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_{j+1}^i - \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_j^i \right] + \frac{\omega}{\Delta x_j} \left[\left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_{j+1}^{i+1} - \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_j^{i+1} \right]$

Szczególnym przypadkiem schematu Preissmana jest niejawni schemat Dronkera, w którym współczynniki wagowe są z góry narzucone i wynoszą $\psi = 1,0$ i $\omega = 0,5$. Schemat ten z powodzeniem stosowali Abbot [14], Nachlik [27] oraz Dronkers [28]. Po podstawieniu współczynników wagowych otrzymujemy aproksymowane równania ciągłości i pędu:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t_i}(A_{j+1}^i - A_j^i + S_{j+1}^i - S_j^i) + \frac{1}{2 \Delta x_j}(Q_{j+1}^i - Q_j^i + Q_{j+1}^{i+1} - Q_j^{i+1}) = 0 \\ & \frac{1}{\Delta t_i}(Q_{j+1}^i - Q_j^i) + \frac{1}{2 \Delta x_j} \left[\left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{j+1}^i - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_j^i + \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_{j+1}^{i+1} - \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)_j^{i+1} + \right. \\ & \left. g(A_{j+1}^{i+1} + A_j^i)(z_{j+1}^i - z_j^i + z_{j+1}^{i+1} - z_j^{i+1}) + \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_{j+1}^i - \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_j^i + \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_{j+1}^{i+1} - \left(\frac{Q_B^2}{A_B} \right)_j^{i+1} \right] \\ & + 0,5 \left[\left(\frac{Q |Q| n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_j^{i+1} + \left(\frac{Q |Q| n^2 g}{R_H^{4/3} A} \right)_j^i \right] = 0 \end{aligned}$$

9. Kryteria wyboru analizowanych przykładów

Poligonem badawczym jest fragment obszaru dolnej Odry zawarty między Ognicą (górna granica obszaru), a szczecińskimi Pomorzaniem i Zdrojami. Autor uznał, że uwzględnienie jeziora Dąbie oraz skomplikowanej sieci kanałów powyżej Parnicy aż do Roztoki Odrzańskiej będzie nieuzasadnionym

obciążeniem modelu, a uzyskane hydrogramy na Regalicy i Odrze Puckiej pozwolą na sformułowanie istotnym wniosków. Jako warunki brzegowe autor przyjął w analizie ruchu ustalonego dziesięć różnych przepływów (jako górny warunek brzegowy) oraz dziesięć rzędnych zwierciadła wody w ujściu modelu (dolny warunek brzegowy), które zawierają się między wartościami ekstremalnymi, które kiedykolwiek zaobserwowano. (tj. NNQ i WWQ oraz NNW i WWW).

10. Podstawowe źródła informacji,

Podczas przygotowania rozprawy doktorskiej kandydat skorzystał z literatury dotyczącej badanego aspektu. Problem przepływów w sieci dolnej Odry od wielu lat stanowi główny nurt badawczy Instytutu Morskiego oddział Szczecin (rozwiązany w 2008 r.) oraz Katedry Budownictwa Wodnego Politechniki Szczecińskiej (od 2012 r. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie). Pierwsze kompleksowe pomiary przepływów wód w kanałach sieci dolnej Odry z użyciem nowoczesnego sprzętu zostały przeprowadzone w latach 2009 - 2010 przez Kurnatowskiego [2011]. Autor planuje wykorzystać wszystkie dostępne materiały, których uda mu się uzyskać.

11. Przykładowe wyniki - Wpływ wariantu modelu na rozdział wód w węźle Widuchowa

Pierwsze analizy polegały na przebadaniu zmian w rozdziale wód Odry na Odrę Zachodnią i Odrę Wschodnią. W analizie wyników ten stosunek oznaczono symbolem $\eta_w = Q_{OW1}/Q_{OZ1}$.

Gdzie:

Q_{OW1} – przepływ w przekroju Odry Wschodniej przy węźle Widuchowa

Q_{OZ1} – przepływ w przekroju Odry Wschodniej przy węźle Widuchowa

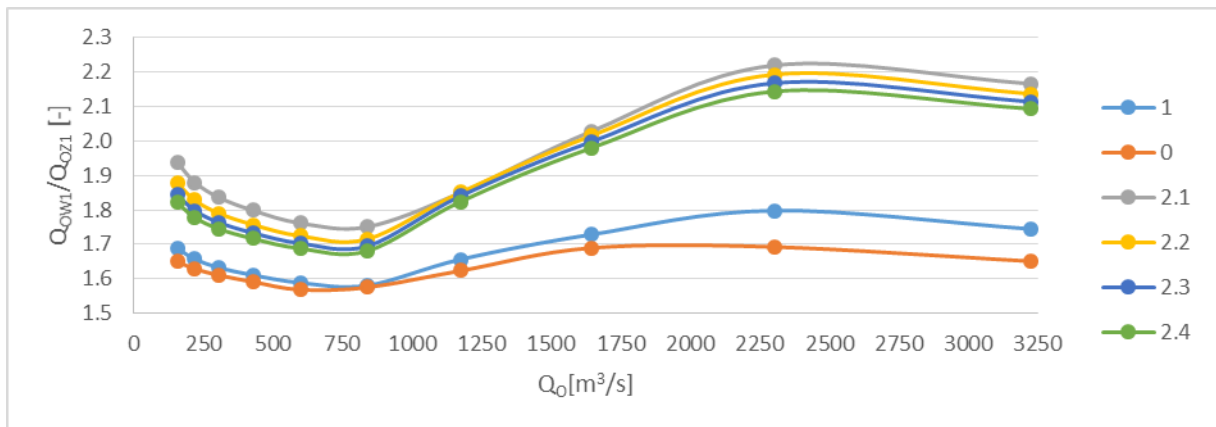
W związku z dużą liczbą przeprowadzonych symulacji, w tym liczbą scenariuszy hydrologicznych, w pracy umieszczono i przeanalizowano podstawowy zbiór „scenariuszy miarodajnych”, gdyż inne rozwiązania z danej grupy dostarczają podobnych wyników:

1. Rzędne zw. wody na ujściach modelu:
 - -0,5 m n.p.m. – reprezentacja grupy stanów niskich: (-0.70, -0.50, -0.30)
 - 0,0 m n.p.m. – reprezentacja grupy stanów średnich: (-0.10, 0.00, 0.10)
 - 0,7 m n.p.m. – reprezentacja grupy stanów wysokich: (0.30, 0.50, 0.70, 0.90)
2. Przepływ na wejściu:
 - 218,4 m³/s – reprezentacja grupy przepływów niskich: (156, 218, 306)
 - 599,3 m³/s – reprezentacja grupy przepływów średnich: (428, 599, 839)

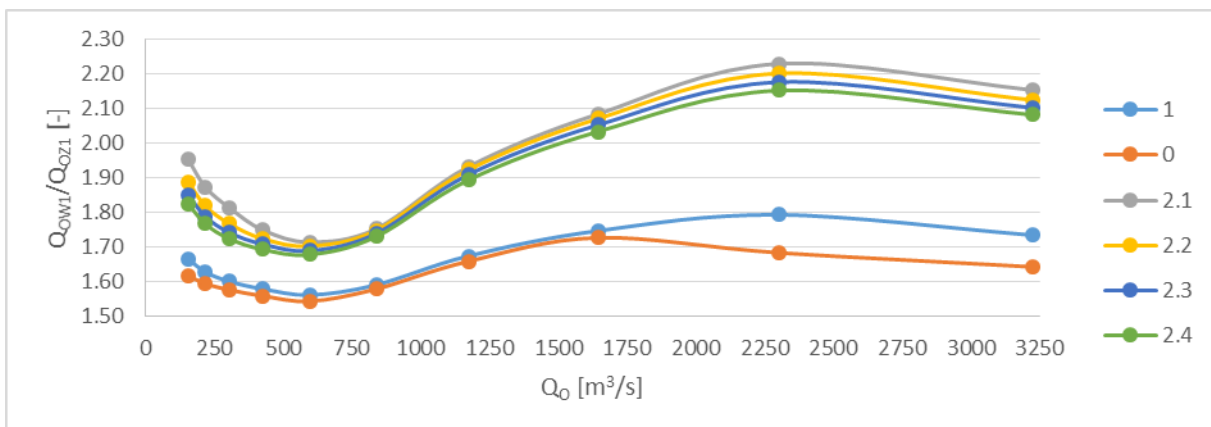
- 2302,2 m³/s – reprezentacja grupy przepływów wysokich: (1175, 1644, 2302, 3223)

Na rysunkach 1 – 6 przedstawiono funkcje rozdziału przepływów w zależności od przyjętego wariantu numerycznego. W przypadku wariantu 2 przedstawiono cztery jego wersje z różnymi globalnymi współczynnikami cieków wewnętrznych. Zastosowano następujące oznaczenia wariantu 2:

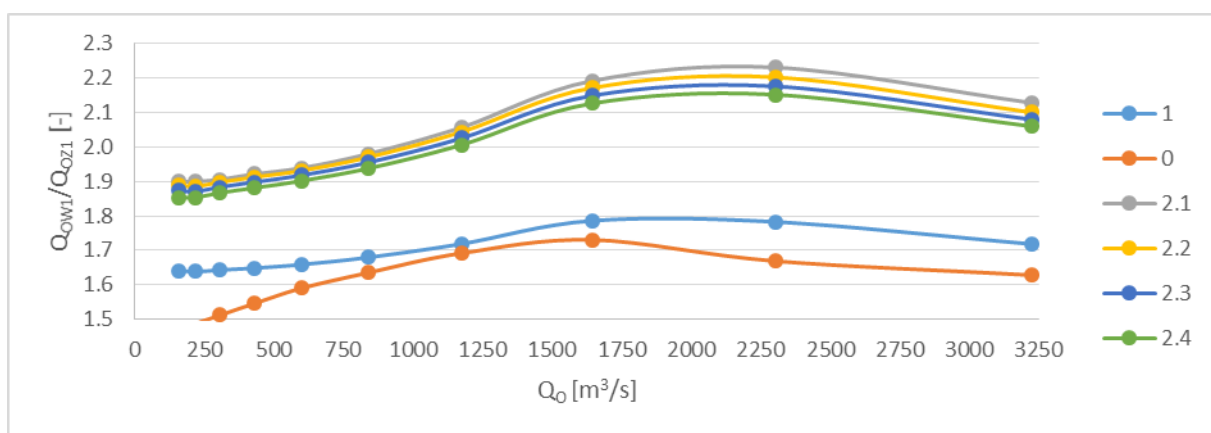
- Wariant 2.1 – współczynnik szorstkości cieków wewnętrznych $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$,
- Wariant 2.2 – współczynnik szorstkości cieków wewnętrznych $n = 0,030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$,
- Wariant 2.3 – współczynnik szorstkości cieków wewnętrznych $n = 0,040 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$,
- Wariant 2.4 – współczynnik szorstkości cieków wewnętrznych $n = 0,050 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.



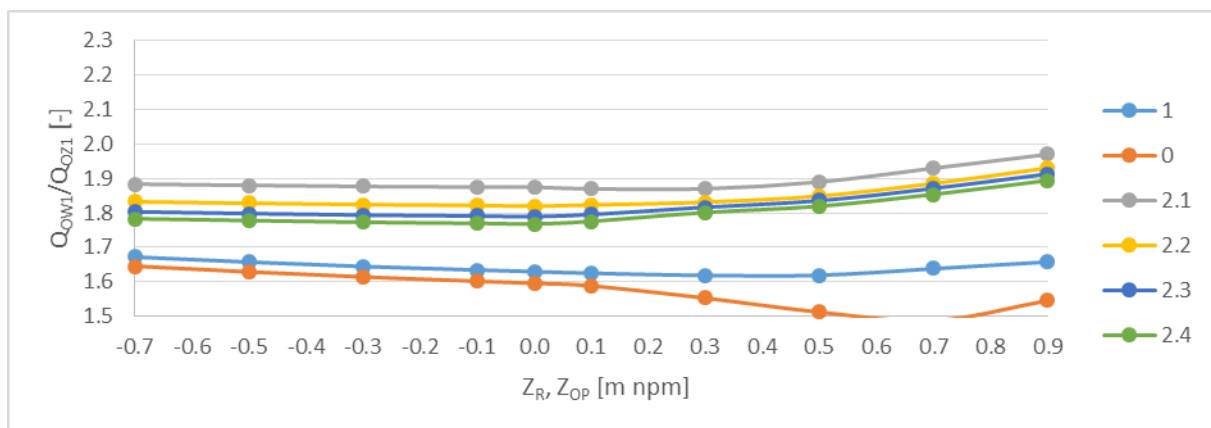
Rysunek 1. Porównanie współczynnika $\eta_w (Q_0)|_{z_K=-0.50}$ dla różnych wariantów modelu



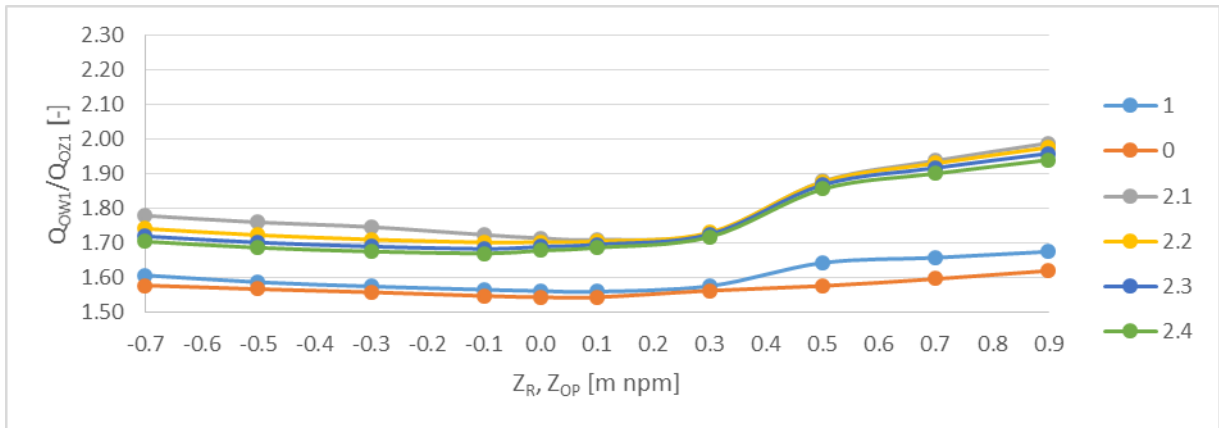
Rysunek 2. Porównanie współczynnika $\eta_w(Q_0)|_{z_K=0.00}$ dla różnych wariantów modelu



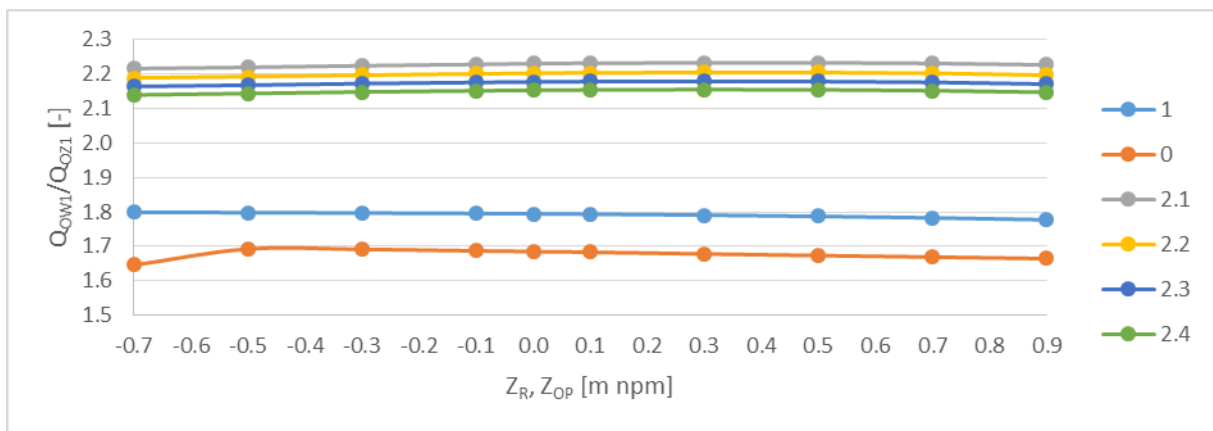
Rysunek 3. Porównanie współczynnika $\eta_w(Q_0)|_{z_K=0.70}$ dla różnych wariantów modelu



Rysunek 4. Porównanie współczynnika $\eta_w(Z_K)|_{Q_0=218}$ dla różnych wariantów modelu



Rysunek 5. Porównanie współczynnika $\eta_w(Z_K)|_{Q_0=599}$ dla różnych wariantów modelu



Rysunek 6. Porównanie współczynnika $\eta_w(Z_K)|_{Q_0=2302}$ dla różnych wariantów modelu

Wszystkie wykresy wykazują, że największe wartości rozdziału przepływów uzyskuje się w wariacie 2, niezależnie od założonego współczynnika szorstkości cieków wewnętrznych. Wraz ze wzrostem wartości współczynnika szorstkości cieków wewnętrznych maleją wartości stosunku przepływów. Pomimo dużej różnicy w wartościach współczynników szorstkości, wartości obliczonych stosunków są zbliżone, a średnia różnica między skrajnymi funkcjami (tj. 2.1 i 2.4) wynosi średnio 0.07.

Porównując ze sobą przebiegi funkcji $\eta_w(Z_K)|_{Q_0=const=599}$ (rys. 5) oraz $\eta_w(Q_0)|_{Z_K=const=0.00}$ (rys. 2) można zauważyć, że rozdział przepływów w węźle Widuchowa jest znacznie bardziej wrażliwy na zmiany przepływu wejściowego Q_0 niż na zmiany rzędnych Z_K w dolnych przekrojach systemu. W poniższej tabeli przedstawiono różnice między maksymalnymi, a minimalnymi wartościami funkcji.

Różnice między wartościami funkcji

	Rysunek 1	Rysunek 2	Rysunek 3	Rysunek 4	Rysunek 5	Rysunek 6
Wariant 0	0.12	0.18	0.24	0.16	0.08	0.05
Wariant 1	0.22	0.23	0.15	0.05	0.12	0.02
Wariant 2.1	0.47	0.52	0.33	0.10	0.28	0.02
Wariant 2.2	0.48	0.50	0.32	0.11	0.27	0.02
Wariant 2.3	0.47	0.49	0.31	0.12	0.28	0.01
Wariant 2.4	0.46	0.47	0.30	0.13	0.27	0.02

Najmniejsze różnice obserwuje się na rysunku 6, czyli przy ustalonym w czasie bardzo wysokim przepływie na wejściu do modelu w funkcji zmiany rzędnej zwierciadła wody w ujściu. Funkcje te są prawie równoległe do osi poziomej, co oznacza braku wpływu zmiany rzędnej zwierciadła wody w ujściu na kształtowanie się rozpliwów w węźle Widuchowa w trakcie trwania wysokich przepływów.

12. Wnioski i wytyczne pracy doktorskiej

Przeprowadzone obliczenia i wyniki w niniejszej pracy pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Zbudowany w ramach pracy model symulacji przepływów i stanu wody na obszarze dolnej Odry obejmującej jej główne ramiona i obszar Międzyodrza świadczy o możliwości wykorzystania środowiska Hec-Ras do konstrukcji zaawansowanych modeli ruchu wody w skomplikowanych sieciach rzecznych typu pierścieniowego. Możliwości te rozszerzono o opracowanie wariantów modelu różniących się stopniem uwzględniania retencyjności i zdolności przepływowej obszaru Międzyodrza, z wykorzystaniem sterowanych i niesterowanych budowli hydrotechnicznych umieszczonych na różnych odcinkach rzeki.
2. W celu zbadania konsekwencji hydraulicznych związanych ze sposobem zagospodarowania obszaru Międzyodrza zbudowano trzy warianty modelu, z których pierwszy odzwierciedla stan istniejący, czyli swobodną retencję na Międzyodrzu, drugi opisuje sytuację całkowitej blokady hydraulicznej Międzyodrza, a trzeci najbardziej rozbudowany pozwala na uruchomienie przepływu przez połączenia Międzyodrza między dwoma głównymi ramionami Odry – Odra Wschodnia i Odra Zachodnia. Opracowanie tych wariantów stanowi realizację tezy postawionej w ramach pracy.
3. Przeprowadzona kalibracja i weryfikacja wykazały poprawność zbudowanego modelu. Podczas weryfikacji, w większości przypadków uzyskano bardzo dobrą zgodność między obliczeniami a pomiarami, w której odchyłka obliczeń od wartości pomiarowej nie

przekraczała 1%. W trakcie weryfikacji i kalibracji występowało także pojedyncze przypadki większych rozbieżności między wartościami pomierzonymi i obliczonymi. Przyczyny tych rozbieżności były natury technicznej (zastosowany stały współczynnik wydatku na jazie Widuchowa) oraz natury praktycznej (niedokładność pomiarów, brak pomiarów itp.). W przyszłości niezbędnym wydaje się rozszerzenie badań nad zależnością współczynnika wydatku od dynamiki zjawisk hydrodynamicznych na jazie oraz prowadzenie kompleksowych prac pomiarowych.

4. W wyniku kalibracji modelu dla obszaru Międzyodrza dla warunków aktualnych (wariant 0 modelu) uzyskano krzywoliniową zależność między globalnym współczynnikiem szorstkości a przepływem zasilającym całą sieć. Otrzymana zależność potwierdza wyniki wcześniejszych badań, dotyczących określania oporów ruchu w sieci rzecznej dolnej Odry w zależności od przepływu. Zdaniem autora uzyskana zależność wymaga dalszej weryfikacji dla rozszerzonego zbioru danych wejściowych (aktualizacja batymetrii) i pomiarowych (pomiar przepływu i stanów wód).
5. Przeprowadzone obliczenia w warunkach ruchu ustalonego wykazały, że obszar sieci dolnej Odry od Widuchowej do Kanału Leśnego jest istotnie wrażliwy na sytuację hydrologiczną (warunki brzegowe):
 - Wraz ze wzrostem rzędnej zwierciadła wody w ujściu rośnie stosunek przepływów w Odrze Wschodniej do przepływu w Odrze Zachodniej (współczynnik η_w). Z kolei, wzrost przepływu przy ustalonym w ujściu zwierciadle wody nie determinuje kierunku zmian współczynnika η_w , ponieważ najmniejszy stosunek przepływów obserwuje się przy średnich wartościach przepływu.
 - W wyniku włączenia obszaru Międzyodrza do modelu sieciowego, zarówno jako niesterowany polder zalewowy jak i jako system kanałów, wzrost rzędnej zwierciadła wody w ujściu powoduje wzrost redukcji przepływu w Odrze Wschodniej. Podobny skutek wywołuje także wzrost wartości przepływu wejściowego.
 - Przeprowadzone symulacje wykazały, że przepływy w Skońnicy są bardzo uzależnione od zmian reżimu hydrologicznego. Wykazano, że przepływ w Skońnicy jest mniej więcej stałą funkcją liniową przepływu zasilającego, w zależności od wzrostu ustalonej rzędnej końcowej w przekrojach Regalica i Odra Pucka (od ok. 5 % dla najmniejszych Z_K do 6.5 % przy najwyższych Z_K). W przypadku ustalenia przepływu wejściowego udział przepływu w Skońnicy jest liniową funkcją rosnącą wzrostu stanów wody na dolnych granicach systemu osiągając wartości także od 5 do 6.5 %.

- Stosunek przepływów w Regalicy do przepływów w Odrze Puckiej (współczynnik η_K) jest znacznie mniejszy od stosunku przepływów w węźle Widuchowa (współczynnik η_W), co oczywiście spowodowane jest występowaniem Międzyodrza, Skońnicy i Kanału Leśnego. Badania wykazały niewielki wpływ warunków hydrologicznych na wartość współczynnika η_K (największa różnica wartościami współczynnik η_K wynosi 0.12, podczas gdy maksymalna różnica w węźle Widuchowa dla współczynnik η_W jest równa ok. 0.50). Wynika z tego, że nawet przy bardzo skrajnych rozdziałach przepływu wód w węźle Widuchowa (np. 70 % Odra Wschodnia, 30 % Odra Zachodnia), przepływy w przekrojach ujściowych będą rozłożone prawie równomiernie.
6. Obecność jazu Widuchowa w korycie Odry Zachodniej i sterowanie nim istotnie wpływa na kształtowanie się przepływów w sieci dolnej Odry. Zwiększenie liczby zamknięć jazu, niezależnie od panującego reżimu hydrologicznego powoduje zwiększenie wartości współczynnika η_W . W przypadku uwzględnienia Międzyodrza jako czynnego hydraulicznie (wersje modelu 0 i 2), wraz z zamykaniem jazu rośnie również wartość redukcji przepływu w Odrze Wschodniej. Średnio redukcja przepływu w Odrze Wschodniej wynosi ok. 18 % przepływu wejściowego do sieci. W tych samych sytuacjach występuje także wzrost przepływów w Skońnicy – obrazuje to zachowanie współczynnika η_S . Jego maksymalna różnica w globalnym przepływie dla jazu całkowicie otwartego i jazu otwartego przy jednym prześle wynosi ok. 2.1 %. Wpływ pracy jazu nie jest zauważalny na dole systemu, co uwidocznione w bardzo małej zmienności współczynnika η_K w zależności od sposobu otwarcia jazu (maksymalna różnica η_K wynosi ok. 0.07).
 7. Analiza wrażliwości modelu sieci dolnej Odry wykazała dużą czułość kanałów i rzek sieci dolnej Odry na zmiany wartości współczynnika szorstkości, traktowanego tutaj jako parametr modelu. Statystycznie najczęściej obserwuje się spadek wartości stosunku rozdziału przepływów w węźle Widuchowa oraz stosunku przepływów w ujściu modelu wraz ze wzrostem globalnego współczynnika szorstkości, choć największe wartości obserwuje się przy maksymalnych stanach i przepływach. Wzrost globalnego współczynnika szorstkości powoduje wzrost redukcji przepływu w Odrze Wschodniej. Udział Skońnicy w globalnym przepływie maleje wraz ze wzrostem szorstkości niezależnie od panującego reżimu hydrologicznego.
 8. Wyniki badań i wykonane symulacje sugerują, że w przypadku realizacji prac remontowych i bagrowania na obszarze Międzyodrza ich wpływ będzie bardzo istotny w kontekście hydrauliki sieci rzecznej dolnej Odry:

- Bagrowanie kanałów Międzyodrza spowoduje istotny wzrost stosunku przepływów w węźle Widuchowa (wartości η_w), a założenie niskich wartości współczynnika szorstkości wybagrowanych kanałów wywoła dodatkowy wzrost tego rozdziału. W przypadku zamknięcia wszystkich budowli i urządzeń Międzyodrza (wariant 1 modelu) również wystąpi wzrost rozdziału przepływów, jednak nie będzie on tak duży jak w przypadku wariantu modelu z bagrowaniem.
 - Bagrowanie kanałów będzie skutkować wzrostem redukcji przepływów w Odrze Wschodniej na skutek zwiększenia przepustowości hydraulicznej Międzyodrza. W odniesieniu do sytuacji aktualnej (wariant 0 – poldery niesterowane) wartości te zwiększą się nawet czterokrotnie. Istotną rolę będzie odgrywać wartość współczynnika szorstkości cieków na Międzyodrze, gdyż wartości funkcji redukcji przepływu $\Delta O_w(Z_K)$, uzyskane przy małym współczynniku szorstkości, mogą wzrosnąć dwukrotnie przy dużym współczynniku szorstkości kanałów Międzyodrza (Rys. 68 i 69). Remont zabudowy hydrotechnicznej i zamknięcie jej determinuje sytuację o utrzymaniu ustalonego przepływu na długości całej Odry Wschodniej (realizacja wariantu 1 modelu).
 - Wyniki modelowania wariantu 1 wskazują, że remont zabudowy hydrotechnicznej wywoła wzrost przepływów w Skońnicy, lecz istotne różnice obserwuje się wyłącznie przy wysokich stanach i przepływach. Bagrowanie kanałów spowoduje istotny spadek przepływów w Skońnicy, a ponadto, zakładając niską szorstkość cieków wewnętrznych Międzyodrza, różnica w wartościach η_s wynieść może nawet ok. 4 %.
 - Symulacje wskazują na to, że wykonanie bagrowania tylko nieznacznie zmniejszy współczynnik η_K (stosunek przepływów w ujściu modelu). Różnice między sytuacją aktualną a wariantem po bagrowaniu wynoszą od 0.2 do 0.5 w zależności od szorstkości kanałów Międzyodrza. Okazuje się, że wyłączenie obszar Międzyodrza z obliczeń (wariant 1 modelu) nie spowoduje istotnych zmian w hydrogramach w ujściach modelowanego systemu.
9. W ramach obliczeń ruchu nieustalonego przeprowadzono analizę zachowania się hydrogramów przepływu w zależności od zastosowanego wariantu modelu, stopnia otwarcia jazu Widuchowa oraz zmian globalnego współczynnika szorstkości. Sposób sterowania jazem jak i zmiana współczynnika szorstkości mają bardzo podobny wpływ na zmianę obliczonych hydrogramów przepływu i nie będą osobno omawiane. Przeprowadzone symulacje ruchu nieustalonego potwierdziły ponadto wnioski z ruchu ustalonego, dotyczące pracy jazu Widuchowa oraz analizy wrażliwości na zmiany globalnej szorstkości rzek sieci dolnej Odry.

10. Istotne spostrzeżenia wynikające z analizy wyników ruchu nieustalonego dotyczą wpływu wariantu modelu na zachowanie się hydrogramów przepływu we wnętrzu sieci obliczeniowej:
- Zauważono, że w przypadku wariantu 1 modelu występuje wzrost wartości maksymalnych przepływów we wszystkich profilach Odry Wschodniej, Skońnicy i Regalica i równoczesny spadek w profilach odcinków Zachodniej części sieci.
 - W przypadku wariantu 2 sytuacja jest bardziej złożona, gdyż w górnej i dolnej części analizowanej sieci obserwuje się wzrost wartości hydrogramów, z kolei w środkowej części (końcowe przekroje Odry Wschodniej) następuje ich spadek w odniesieniu do wyników wariantu 0. Przyczyną takiego zróżnicowania jest włączenie się kanałów Międzyodrza w proces przepływu między głównymi odnogami sieci.
11. W przypadku rozwiązania dla wezbrań odmorskich, w hydrogramach przepływu występuje wprawdzie minimum, na skutek wyhamowania odpływu spowodowane wzrostem rzędnych zwierciadeł wody na końcach systemu, a następnie maksimum przepływu spowodowane bezwładnością zmagazynowanej w sieci wody, a następnie ponowny spadek do wartości odpowiadającej ruchowi ustalonemu. W sytuacjach ekstremalnego wezbrania odmorskiego może dojść do odwrócenia kierunku przepływu.
12. Analiza propagacji fali wykazała, że przeprowadzenie bagrowania istotnie spowoduje przesunięcie szczytu fali (w przypadku profilu Odra Pucka w km 32.95 różnica może wynieść nawet 20 godzin). Związane z tym jest także skrócenie okresu fali które dla przekroju Odry Puckiej wynieść może nawet 40 min.
13. Analiza przebiegu fali o bardzo dużej wielkości przepływu maksymalnego wykazuje istnienie związku między przepływem a stanem w trakcie jej transformacji przez rozpatrywany system.
14. Analiza wrażliwości transformacji fali na długości sieci wskutek zmiany globalnego współczynnika szorstkości wykazała dużą zmienność parametrów transformowanej fali. O ile wartości szczytów fal nie ulegają istotnym zmianom, tak różnice w okresach tych fal i momentach osiągnięcia szczytów są bardzo duże i wynosić mogą ponad 10 godzin.
15. Przeprowadzony bilans wodny sieci w trakcie przejścia fali wykazał dużą zgodność objętości wezbrania wchodzącego do sumy objętości z hydrogramów uzyskiwanych na końcach modelu, co potwierdza spełnienie prawa zachowania masy przez model.
16. Zbudowany model nadaje się do symulacji rzeczywistych wezbrań, choć wyniki uzyskane dla tych fal mają w pracy jedynie charakter poglądowy, gdyż brak wystarczających danych w postaci hydrogramów pomiarowych stanów i przepływów w profilach wewnętrznych dla ich zweryfikowania.

W świetle dokonanej analizy i wniosków następnymi etapami rozbudowy modelu powinny być:

1. Rozszerzenie obszaru badań do obszaru Kostrzyn nad Odrą lub Bielinek – Rostoka Odrzańska wraz z jeziorem Dąbie,
2. Opracowanie szerszego zestawu scenariuszy hydrologicznych uwzględniającego m.in. występowanie niżówek i niskich stany morza,
3. Rozbudowa modelu jazu Widuchowa oraz szczegółowa kalibracja współczynników wydatku uwzględniająca możliwość zamykania poszczególnych peletów w przesłach jazu,
4. Analizy wpływu wariantu modelu, wpływu zmian wartości globalnych współczynników szorstkości cieków głównych i wewnętrznych (w przypadku wariantu 2) oraz wpływu stopnia zamknięcia jazu na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń i ruch rumowiska w sieci dolnej Odry,
5. Opracowanie nowego wariantu, traktujący obszar Międzyodrza w sposób dwuwymiarowy oraz określenie stopnia współpracy jednowymiarowego modelu sieci rzecznej z dwuwymiarowym modelem obszaru zalewowo-przepływowego, jakim jest Międzyodrze,
6. Analiza wpływu kierunku wiatru i jego wartości na kształtowanie się przepływów w sieci dolnej Odry.

13. Wykaz literatury przedmiotu z podziałem na bibliografię w języku polskim i w językach obcych.

Bibliografia w języku polskim.

Boczarski, J., Sajko, B. i Ziebro, J. (1975). *Określenie optymalnego rozdziału przepływu dolnej Odry ze względu na ochronę wód Ochry Zachodniej*. Szczecin: Badania Hydrauliczne, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Instytut Inżynierii Wodnej Politechniki Szczecińskiej nr 41.

Buchholz, W. (1990). *Materiały do monografii dolnej Odry*. Gdańsk: IBW-PAN.

Buchholz, W. (1991). *Monografia dolnej Odry*. Gdańsk: IBW-PAN.

Czetwertyński, E. i Szuster, A. (1973). *Hydrologia i hydraulika*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Szkolnictwa Wyższego.

Czetwertyński, E. i Utrysko, B. (1968). *Hydraulika i hydromechanika*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

- Dybkowska - Stefek, D. (1994). *Wpływ niesterowanej retencji terenów zalewowych na kształtowanie się stanów i przepływów w sieci rzecznej*. Warszawa: Rozprawa doktorska.
- Dybkowska - Stefek, D. (1995). *Wykorzystanie modeli hydrodynamicznych w gospodarce wodnej na przykładzie złożonego modelu przepływu w rejonie Międzyodrz*. Szczecin: Prace naukowe Instytutu Morskiego, Oddział w Szczecinie.
- Dybkowska - Stefek, D. i Pluta, M. (1996). *The acquisition of hydrological information for Odra river estuary*. Gdańsk: Hydrotechnical Transactions, IBW PAN.
- Dziadziuszko, Z. i Jednorą, T. (1987). *Wahania poziomów morza na polskim Bałtyku*. Gdynia: Studia i materiały oceanologiczne, Dynamika morza.
- Ewertowski, R. (1983). *Numeryczny model symulacji jednowymiarowego ruchu nieustalonego w złożonej sieci rzecznej na przykładzie sieci Dolnej Odry*. Warszawa: Rozprawa doktorska.
- Ewertowski, R. (1985). *Możliwości i ograniczenia wykorzystania modeli ruchu ustalonego i nieustalonego dla różnych sieci rzecznych*. Gdańsk, Słupsk, Szczecin: Badania hydrauliczne, Wydawnictwo Instytutu Morskiego.
- Ewertowski, R. (1996). *Analiza porównawcza podstawowych zależności między ciągami pomiarowymi ciśnienia atmosferycznego, wiatrów i stanów wody w ujściu Odry*. Grodno: Materiały XVI Szkoły Hydrauliki.
- Ewertowski, R. (2006). *Niedopasowanie warunków początkowych i brzegowych w 1-W modelu ruchu nieustalonego wody*. Dziwnów: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Indyk, W., Mazoń, S. i Potocki, A. (2011). *Instrukcja gospodarowania wodą dla jazu usytuowanego w km 0,0 rzeki Odry Zachodniej w Miejscowości Widuchowa*. Kraków.
- Instrukcja obsługi jazu w Widuchowej. (1996). Szczecin.
- Instytut Morski Oddział w Szczecinie. (brak daty). *Dane batymetryczne: dolna Odra Gozdowice-Trzebież*.
- Jasińska, E. (1991). *Dynamika słonych wód w estuariach polskich rzek*. Gdańsk: Prace IBW PAN Nr 24.
- Jasińska, E. (1992). *Ruch słonych wód w estuarium Odry*. Gdańsk: IBW PAN.
- Kantorowicz, V. (1981). *Finite Element Approach to Computation of Unsteady Flow Using the Saint Venant Equation*. Bratislava: International Conference of Numerical Modelling of River.
- Kowalewska-Kalkowska, H. (Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego). *Rola wezbrań sztormowych w kształtowaniu ustroju wodnego układu dolnej Odry i Zalewu Szczecińskiego*. Szczecin: 2012.

- Kubrak, E. i Kubrak, J. (2004). *Hydraulika techniczna, Przykłady obliczeń*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Kurnatowski, J. (1989). *Symulacyjny model sieci rzecznej o dowolnej strukturze topologicznej na przykładzie dolnej Odry*. Szczecin: Badania Hydrauliczne, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Instytut Inżynierii Wodnej Politechniki Szczecińskiej nr 29.
- Kurnatowski, J. (2004). *Współczynniki szorstkości a położenie geoidy*. Dziwnów: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Kurnatowski, J. (2006). *Modelowanie przepływów dolnej Odry w różnych wysokościowych układach odniesienia*. Dziwnów: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Kurnatowski, J. (2011). *Wybrane problemy obliczeń ruchu wód w sieciach rzecznych o strukturze pierścieniowej na przykładzie dolnej Odry*. Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, ISBN 978-83-7663-096-0.
- Kurnatowski, J. i Roszak, A. (2007). *Formy denne dolnej Odry*. Szczecin: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Majewski, A. (1972). *Charakterystyka hydrologiczna estuariowych wód u polskiego wybrzeża*. Warszawa: Prace PIHM.
- Mańko, R. (2010). *Model krzywej piętrzenia/depresji dla koryt otwartych o dowolnych przekrojach poprzecznych z zastosowaniem dla wybranego odcinka Odry*. Szczecin: Praca dyplomowa inżynierska.
- Meyer Z. (2010). *Piętrzenie wiatrowe w ujściu rzeki w warunkach silnych wiatrów*, Międzynarodowa Konferencja pn. Odrzańska Droga Wodna, Stan obecny i perspektywiczny, Warszawa
- Mroziński, Z. (2006). *Identyfikacja parametrów równania wydatku dla jazu Widuchowa*. Dziwnów: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Nachlik, E. (1982). *Numeryczne stadium propagacji fal powodziowych w systemie rzeczonym*. Kraków: Rozprawa doktorska.
- Orlewicz, S. i Mroziński, Z. (2002). *Hydrologia Dolnej Odry: Dolina Dolnej Odry. Monografia przyrodnicza Parku Krajobrazowego*. Szczecin: Wydawnictwo Szczecińskie Towarzystwo Naukowe.
- Orlewicz, S., Buchholz, W., Kurnatowski, J. i Mroziński, Z. (1980). *Metoda obliczania rozpliwów w ujściowym odcinku Odry na przykładzie wielkich wód*. Szczecin: Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej.

- Orlewicz, S., Kurnatowski, J., Kreft, A. i Mroziński, Z. (1983). *Współzależność dynamiki i zasobów wodnych dolnej Odry*. Opole: Odra i nadodrze, Instytut Śląski.
- Osadczyk, A., Musielak, S. i Borówka, R. (2007). *Why should the Odra river mouth area not be regarded as an estuary*. Gdańsk: Instytut Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego.
- Pluta, M. (1994). *Wpływ stopnia otwarcia budowli piętrzącej na kształtowanie się stanów i przepływów wody w sieci ujścia rzeki na przykładzie jazu w Widuchowej na rzece Odrze*. Szczecin: Rozprawa doktorska.
- Pluta, M. (1998). *Characteristics of the wind in the Odra estuary*. Szczecin: 7th Seminar on Problems of Geoengineering in Odra River Mouth.
- Roszak, A. (2007). *Wpływ rumowiska na współczynnik szorstkości dolnej Odry*. Dziwnów: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Sawicki, J. (1998). *Przepływy ze swobodną powierzchnią*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Szczepaniak-Kreft, A. (2007). *Jaz Widuchowa po modernizacji*. Szczecin: Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki.
- Szymkiewicz, R. (1995). *Numerical stability of implicit four-point scheme applied to inverse linear flow routing*. Gdańsk: Journal of Hydrology.
- Szymkiewicz, R. (2000). *Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Wiśniewski, B. i Wolski, T. (2000). *Changes in Dąbie Lake bathymetry in the period 1962-1996*. Szczecin: Limnological Review.
- Wolski, T. (2004). *Prądy jeziora Dąbie i ich związek z reżimem hydrologicznym obszaru ujściowego Odry*. Szczecin: Rozprawa doktorska.
- www.wloczykij.com/index.php?plik=pokaz&pokaz_ID=102. (brak daty).

Bibliografia w językach obcych

- Abbot, M. (1975). *Method of Characteristics, Unsteady Flow in Open Channels, Chapter 3*. Fort Collins, Colorado: Edited by K. Mahmood and V. Yevjevich.
- Abbott, M. (1979). *Computational Hydraulics*. London: Pitman.
- Arcement, G. i Schneider, V. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339.

- Benedini, M. i Tsakiris, G. (2013). *Water Quality Modeling for River and Streams*. London: Springer.
- Carlos, A. (1975). *Solution of linear equations with Skyline-Stored symmetric Matrix*. Computers & Structures. Vol. 5. pp. 13-29.
- Chau, K. (1990). *Application of the Preissmann scheme on flood propagation in river systems in difficult terrain*. IAHS Publ. no. 193.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, ISBN-07-0107769.
- Cunge, J., Holly, F. i Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. London: Pitman.
- Dronkers, J. (1969). *Tidal Computations in Rivers and Coastal Areas and seas*. Journal of the Hydraulic Division, no. 1.
- Ewertowski, R. (1988). *Mathematical Model of the Oder River Estuary*. Bulletin P.I.A.N.C. 60.
- Fread, D. (1981). *Numerical hydrodynamic modeling of rivers for flood forecasting by the national weather service*. Bratislava: International Conference on Numerical Modelling of River, Channel and Overland Flow for Water Resources and Environmental Applications.
- Fread, D., Ming, J. i Lewis, J. (1996). *An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation*. Anaheim CA: North American Water Congress, American Society of Civil Engineering.
- Granatowicz, J. i Szymkiewicz, R. (1989). *Porównanie efektywności rozwiązania równań de Saint Venanta metodą elementów skończonych i metodą różnic skończonych*. Archiwum Hydrotechniki, XXXVI tom, 3-4.
- Gunduz, O. (1990). *Numerical Solution of Flow Equations*. Numerical Modeling of Flow and Contaminant Transport in Rivers.
- Hec-Ras River Analysis System. (2010). *Hydraulic Reference*. Davis CA: version 4.1.
- Hec-Ras River Analysis System. (2010). *User's Manual*. Davis CA: version 4.1.
- Liggett, J. i Cunge, J. (1975). *Numerical Method of Solution of Unsteady Flow Equation*. Colorado: Unsteady Flow in Open Channels.
- Lyn, D. i Goodwin, P. (1987). *Stability of a General Preissmann Scheme*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Meyer Z. (2009). Hydraulic Conditions of Water Flow in River Mouth, *Studia Geotechnica at Mechanica*, Vol. XXXI, No 3
- Meselhe, E. i Holly, F. (1997). *Invalidity of Preissmann Scheme for Transcritical Flow*. Journal of Hydraulic Engineering.

- Pritchard, D. (1967). *What is an estuary: physical viewpoint*. Washington, DC: In Lauf, G. H. Estuaries. A.A.A.S.
- Rezzola, L. (2011). *Numerical Methods for the Solution of Partial Differential Equations, Lecture Notes for the COMPSTAR School on Computational*. Potsdam: Albert Einstein Institute, Max-Planck-Institute for Gravitational Physics.
- Roache, P. (1998). *Computational Fluid Dynamics*. Hermosa Publishers.
- Sivaloganathan, K. (1978). *Flood Routing by Characteristic Method*. Journal of hydraulic division, no. 7.
- Sivaloganathan, K. (1979). *Channel Flow Routing using Charateristic*. Journal of hydraulic division, no. 7.
- Syme, W. (2001). *Modelling of Bends and Hydraulic Structures in a Two Dimensional Scheme*. Hobart: The Institution of Engineers, Australia Conference on Hydraulics in Civil Engineering.