

# Skuteczność planowanego polderu zalewowego Międzyodrze i koncepcji regulacji cieku na poprawę ochrony przeciwpowodziowej na dolnej Odrze

tłumaczenie polskie (06.06.2018)

z wersji niemieckiej (05.03.2018)

Zlecienniodawca:

Deutscher Naturschutzring (DNR) e.V.  
Dachverband der deutschen Natur-,  
Tier- und Umweltschutzorganisationen (DNR)  
Marienstr. 19/20  
10117 Berlin



Wsparcie:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bornau 2  
49090 Osnabrück



[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Partnerzy projektu:



Wykonawca:

gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung  
An der Pastoa 13  
03042 Cottbus  
Tel.: 0355 / 4838 90  
Fax.: 0355 / 4838 920  
Email: [info@gerstgraser.de](mailto:info@gerstgraser.de)  
Internet: [www.gerstgraser.de](http://www.gerstgraser.de)

Kierownik projektu:

Dr. Christoph Gerstgraser

Referent:

Dr.-Ing. Ingo Schnauder  
M. Sc. Bartosz Domagalski

Tłumaczenie:

Saba Keller

## SPIS TREŚCI

<b>1</b>	<b>UZASADNIENIE .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PODSTAWY PLANISTYCZNE I RAPORTY .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>HYDROLOGIA I POWODZIE W DOLINIE DOLNEJ ODRY.....</b>	<b>8</b>
3.1	Podział obszaru dorzecza Odry.....	8
3.2	Wezbrania powodziowe na Odrze .....	9
3.2.1	Powódzie zatorowe na Odrze.....	10
3.3	Warunki hydrologiczne dolnej Odry .....	12
3.4	Stany wody dolnej Odry w latach 1997 i 2010 .....	16
3.5	Warunki hydrologiczne na dolnej Odrze .....	18
3.5.1	Cofki wiatrowe na Odrze .....	18
3.5.2	Hydrauliczne skutki zjawisk lodowych .....	19
<b>4</b>	<b>MORFOLOGIA ODRY .....</b>	<b>20</b>
4.1	Rozwój dna .....	20
4.1.1	Wpływ przepływów powodziowych na kształt form dennych.....	21
4.2	Formy denne koryta .....	22
4.2.1	Łąchy piasku jako siedliska dla organizmów żywych .....	23
4.3	Mechanizm działania ostróg .....	24
4.3.1	Odziaływanie wzajemne ostróg i formy dennych .....	25
4.3.2	Ostrogi jako miejsca bytowania organizmów żywych.....	27
<b>5</b>	<b>KONCEPCJA OCHRONY PRZECIWPOWODZIOWEJ MIĘDZYODRZE .....</b>	<b>28</b>
5.1	Ogólnie o polderach zalewowych .....	28
5.1.1	Pojęcia i definicje .....	28
5.1.2	Mechanizm działania polderów zalewowych.....	29
5.1.3	Obliczanie pojemności polderów zalewowych .....	30
5.2	Powierzchnia i pojemność polderu Międzyodrze .....	32
5.3	Obliczenia szacunkowe cofki wiatrowej na jeziorze Dąbie.....	34
5.4	Rola i działanie polderu zalewowego Międzyodrze.....	36
5.5	Warianty obliczeniowe transformacji fali wezbraniowej.....	37
5.6	Skuteczność polderu przy redukcji fali wezbraniowej .....	45
5.7	Skutki rozbudowy polderu .....	47
5.7.1	Wpływ obwałowań na wezbrania zatorowe .....	49
5.7.2	Kluczowy punkt jaz w Widuchowej (niem.: Marienhofer Wehr) .....	50
5.7.3	Punkty kluczowe przy mostach na dolnej Odrze.....	53

5.8	Ocena koncepcji ochrony przeciwpowodziowej „Polder Międzyodrze” .....	55
<b>6</b>	<b>KONCEPCJA REGULACJI CIEKU PRZEZ WSA EBERSWALDE .....</b>	<b>56</b>
6.1	Powód i zdefiniowane zadania koncepcji regulacji cieków .....	56
6.2	Definicja średniej głębokości wody .....	57
6.3	Metodologia zastosowana przez BAW .....	58
6.4	Wariant preferowany przez BAW.....	60
6.4.1	Oddziaływanie preferowanego wariantu KRC-V5 .....	61
6.4.2	Oddziaływanie preferowanego wariantu KRC-V5 na zjawiska powodziowe.....	62
6.5	Ocena koncepcji regulacji cieków (KRC).....	64
<b>7</b>	<b>ALTERNATYWNE FORMY OCHRONY PRZECIWPOWODZIOWEJ .....</b>	<b>67</b>
7.1	Działania zastępujące akcje lodołamania z wykorzystaniem lodołamaczy.....	67
7.2	Metody postępowania i problemy z miejscami limitującymi głębokość.....	68
7.2.1	Identyfikacja miejsc limitujących głębokość.....	68
7.2.2	Żegluga w miejscach limitowanych bez występowania zjawisk lodowych.....	71
7.2.3	Podsumowanie miejsc limitujących głębokość i żeglowności szlaku.....	73
7.3	Cofnięcie wałów w rejonie Świętej.....	74
<b>8</b>	<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>77</b>

## WYKAZ SKRÓTÓW

Odcinek 1	powyżej ujścia Warty do 540 km Odry
Odcinek 2	poniżej ujścia Warty do jeziora Dąbskie (km 694)
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe Federalny Instytut Budownictwa Wodnego, Karlsruhe
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz Federalny Instytut Badania Wód, Koblenz
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt Niemiecka Federalna Fundacja Środowiska
DGM	Digitales Geländemodell
NMT	Numeryczny Model Terenu
DIN	Deutsches Institut für Normung Niemiecki Instytut Normalizacyjny
DNR	Deutscher Naturschutzring e.V. Niemieckie Stowarzyszenie Ochroy Przyrody
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Niemiecki Związek do Spraw Gospodarki Wodnej oraz Odpadów
LUA	Landesumweltamt Krajowy urząd ochrony środowiska
SWP <sub>2010</sub>	Średnia woda projektowa na podstawie danych z wielolecia 1981 - 2010 przy przepływie 300 m <sup>3</sup> /s powyżej i 500 m <sup>3</sup> /s poniżej Warty
NQ, MQ, HQ	Niedrigwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserabfluss
NQ, SQ, WQ	niski przepływ, średni przepływ, wysoki przepływ
NW, MW, HW	Niedrigwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserstand
NW, SW, WW	niski stan, średni stan, wysoki stan wody
MKOO	Międzynarodowa Komisja Ochrony Odry
zmod.	zmodyfikowana ilustracja
PAD	Project Appraisal Document w Odra-Vistula Flood Management Project der International Bank for Reconstruction and Development (w skrócie: Bank Światowy) /2/
Q <sub>PÜ80</sub>	Przepływ miarodajny z 80% prawdopodobieństwem przekroczenia (odpowiada 160 m <sup>3</sup> /s dla odcinka 1)
Q <sub>PÜ90</sub>	Przepływ miarodajny z 90% prawdopodobieństwem przekroczenia (odpowiada 250 m <sup>3</sup> /s dla odcinka 2)
KRC	Koncepcja regulacji ciekłu Odry Granicznej opracowanej przez BAW na zlecenie WSA Eberswalde /1/
KRC-V0	Wariant obliczeniowy orzeczenia KRC bez przeprowadzania działań
KRC-V5	Preferowany wariant orzeczenia KRC z naprawą/rozbudową ostróg
Strategiczna OOŚ	Strategiczna ocena oddziaływania na środowisko
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Federalna Administracja Dróg Wodnych i Żeglugi
WSP	zwierciadło wody
WWF	Word Wide Fund For Nature
1D, 2D, 3D	jedno-, dwu- i trójwymiarowy
1D-FTM	Opracowany przez BAW jednowymiarowy model numeryczny transportu materiału stałego

## 1 Uzasadnienie

W dniu 27.04.2015 między Polską a Niemcami podpisane zostało porozumienie o ochronie przeciwpowodziowej na Odrze granicznej, które przewiduje opracowanie „nowej koncepcji regulacji ciek w celu umożliwienia akcji lodołamania“. Na zlecenie Federalnej Administracji Dróg Wodnych i Żeglugi Eberswalde Federalny Instytut Budownictwa Wodnego (BAW) dokonał „Aktualizacji koncepcji regulacji ciek Odry Granicznej“. Zatem dla umożliwienia akcji lodołamania na Odrze granicznej konieczne jest uzyskanie 1,80 metra głębokości wody ze średnim rocznym prawdopodobieństwem przekroczenia na poziomie 80% powyżej i 90% poniżej ujścia Warty. Ujednolicenie i remont istniejących ostróg (odstęp linii regulacyjnych oraz wysokość i nachylenie budowli regulacyjnych) ma zapewnić osiągnięcie tego celu.

Obok koncepcji regulacji ciek Odra strona polska planuje przekształcić Międzyodrza od Widuchowej do przedpola Szczecina w polder zalewowy, co miałyby poprawić ochronę przeciwpowodziową miasta Szczecin. Projekt ten, tak samo jak projekt odnośnie realizacji działań wyszczególnionych w koncepcji regulacji ciek Odry granicznej na polskim brzegu, jest częścią współfinansowego przez Bank światowy „Projektu ochrony przeciwpowodziowej w dorzeczu Odry i Wisły” (Odra-Vistula Flood Management Project).

Zarówno realizacja zamierzeń przedstawionych w koncepcji regulacji ciek jak i rozbudowa Międzyodrza na polder oznacza znaczące oddziaływanie na środowisko, które powinno zostać zbadane w ramach strategicznej OOS. W związku z tym Niemiecka Federalna Fundacja Środowiska (DBU) sfinansowała projekt „Ekologiczna ochrona przeciwpowodziowa obszaru zlewni rzeki Odry ze szczególnym uwzględnieniem regionu Dolina Dolnej Odry“, w ramach którego zainicjowano opracowanie alternatywnej koncepcji ochrony przeciwpowodziowej.

Alternatywna koncepcja ochrony przeciwpowodziowej wymaga fachowego zopiniowania koncepcji regulacji ciek i rozbudowy polderów na Międzyodrzu. Przyjęte dla obu przedsięwzięć założenia i dane wyjściowe zostaną sprawdzone, a hydrauliczne i ekologiczne oddziaływanie planowanych działań poddane fachowej ocenie. W tym celu bliżej rozpatrzone zostaną podstawy morfologii i hydrauliki ciek oraz mechanizm działania ostróg i polderów.

## 2 Podstawy planistyczne i raporty

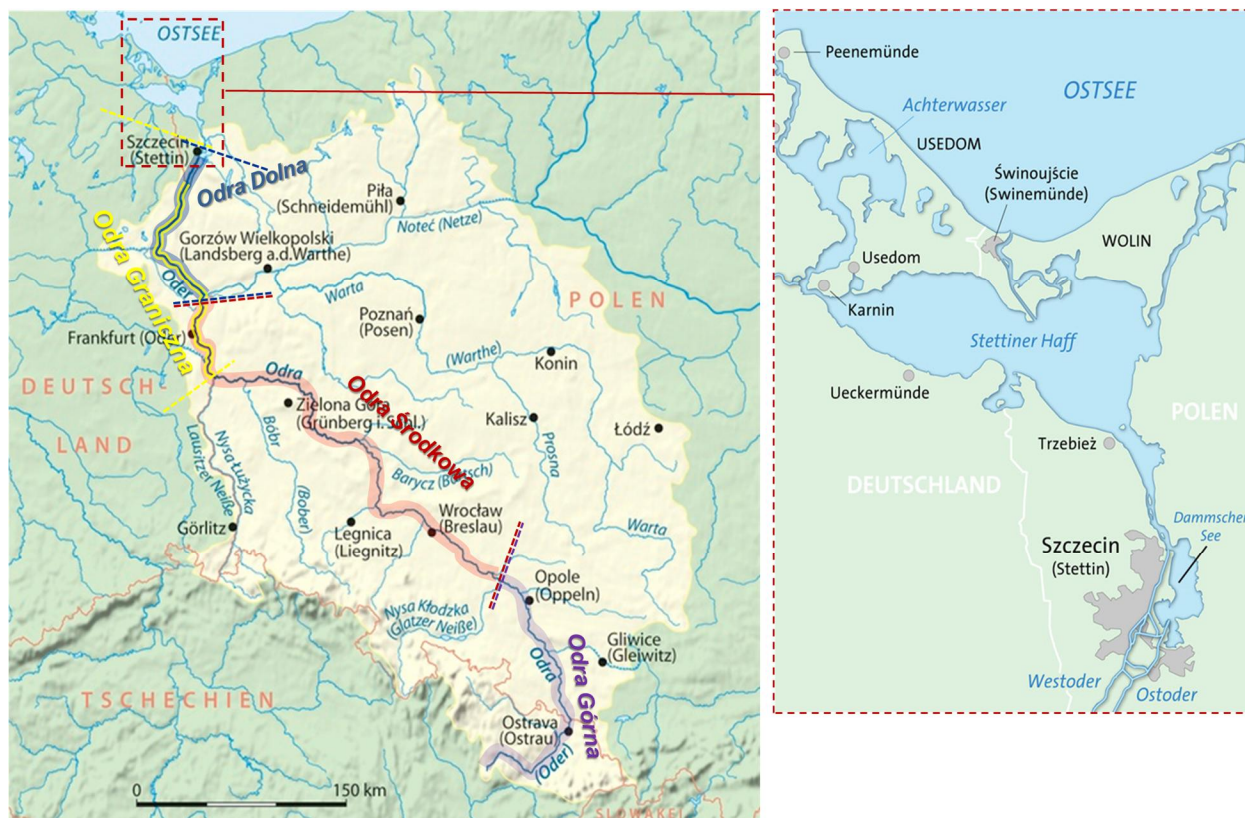
- /1/ BAW (2014): Aktualisierung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder. Gutachten im Auftrag der WSA Eberswalde, Karlsruhe, Mai 2014. (Aktualizacja koncepcji regulacji ciekłu Odry Granicznej Orzeczenie, maj 2014).
- /2/ World Bank (2015): Odra-Vistula Flood Management Project. International Bank for Reconstruction and Development. Report No: PAD1203, July 2015.
- /3/ Grünewald (2000): Zum Entwicklungsstand und zu den Anforderungen an ein grenzüberschreitendes operationelles Hochwasservorhersagesystem im Einzugsgebiet der Oder. Studie im Rahmen des BMBF-Projektes Simulation von Hochwasser im Einzugsgebiet der Oder mit einem gekoppelten Modellsystem. BTU Cottbus.
- /4/ MKOO (2015): Hochwasserrisiko-Managementplan für die Internationale Flussgebiets-einheit Oder. Internationale Kommission zum Schutz der Oder gegen Verunreinigung. Wrocław.
- /5/ Spiegelberg (2012): Das Oderstromsystem - Von der Quelle bis zum Haff. Viademica Verlag, Berlin.
- /6/ Schuh (2011): Eishochwasser an Oder und Elbe aus historischen und meteorologischen Gesichtspunkten und im Hinblick auf mögliche Gefährdungen. Dissertation Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, BTU Cottbus.
- /7/ Garcia (2008): Sedimentation Engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 11.
- /8/ LUA (1998): Das Sommerhochwasser an der Oder 1997. Fachbeiträge anlässlich der Brandenburger Ökologietage II. Landesumweltamt Brandenburg.
- /9/ LUGV (2012): Das Sommerhochwasser der Oder 2010. Fachbeiträge des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg.
- /10/ Pegeldata des WSA Eberswalde vom 1.11.1949 bis 31.10.2016. Tagesmittelwerte der Wasserstände der Pegel Ratzdorf, Eisenhüttenstadt, Frankfurt Oder, Kietz, Kienitz, Hohensaaten-Finow, Stützkow, Schwedt Oderbrücke, Ueckermünde und Karnin. Tagesmittelwerte der Abflüsse in Eisenhüttenstadt und Hohensaaten-Finow.
- /11/ Dane wodowskazowe polskiego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB) - Źródłem danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy. <http://www.imgw.pl/>
- /12/ Dane DGM dla Międzyodrza Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej <http://www.codgik.gov.pl/index.php/darmowe-dane/nmt-100.html>
- /13/ pegelonline - Dane wodowskazów Koserow (Ostsee), Ueckermünde, Mescherin, Gartz, Friedrichsthal, Schwedt Oderbrücke, Stützkow, Hohensaaten-Finow, Kienitz i Kietz (stany wody z godzinnym krokiem czasu od 15.11.2017 do 15.12.2017).
- /14/ Dane odnośnie wiatru stacji w Angermünde i Ueckermünde z godzinnym krokiem czasowym (Climate Data Center: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>).
- /15/ BfG (2015): Untersuchung der großräumlichen hydraulisch-morphologischen Entwicklung an der Grenzoder. BfG-Bericht 1765 im Auftrag der WSA Eberswalde, Koblenz, Januar 2015.

- /16/ „Tezy do późniejszego uregulowania prawnego celem wspólnej poprawy sytuacji na drogach wodnych na pograniczu polsko-niemieckim (ochrona przeciwpowodziowa, warunki przepływu i żeglugi)“. Podpisane 29.10. i 24.11.2008 porozumienie, ze strony niemieckiej podpisał pan Bernd Törkel, dyrektor Departamentu Dróg Wodnych i Żeglugi w Federalnym Ministerstwie Transportu, Budownictwa i Rozwoju Miast, a ze strony polskiej pan Andrzej Sadurski, ówczesny prezes Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej. Zmienne w pracach przygotowawczych do późniejszej międzynarodowej umowy z dnia 18. grudnia 2013 w Szczecinie. Online: [https://www.wsv.de/wsd-o/betrieb\\_unterhaltung/Grenzoder\\_und\\_Hohensaaten-Friedrichsthaler\\_Wasserstrass-Thesepapier\\_24.11.pdf](https://www.wsv.de/wsd-o/betrieb_unterhaltung/Grenzoder_und_Hohensaaten-Friedrichsthaler_Wasserstrass-Thesepapier_24.11.pdf))

### 3 Hydrologia i powódzie w Dolinie Dolnej Odry

#### 3.1 Podział obszaru dorzecza Odry

Odra ma 854 km długości, a jej zlewnia obejmuje obszar około 119.000 km<sup>2</sup>. 89% - czyli największa część - położona jest w granicach Rzeczypospolitej Polskiej. W Republice Czech leży 6%, a pozostałe 5% znajduje się na terenie Republiki Federalnej Niemiec (Ilustracja1)



Ilustracja 1: Obszar zlewni i podział biegu Odry (zmod. z wikipedia)

Ze względu na geomorfologię i charakter przepływów Odrę dzieli się na Odrę górną, środkową i dolną (Tabela 1). Około 160-kilometrowy odcinek Odry środkowej/dolnej, który tworzy granicę między Polską a Niemcami, określany jest mianem Odry granicznej /1/.

Tabela 1: Etapy biegu rzeki i ich charakterystyka

odcinek	km rzeki od - do	średni spadek podłużny	opis
<b>górną Odra</b>	0 - 180,0	0,3‰	od ujścia Ostrawy do ujścia Nysy Kłodzkiej /4/
<b>środknią Odra</b>	180,0 - 620,0	0,28‰	od ujścia Nysy Kłodzkiej do ujścia Warty /4/
<b>dolną Odra</b>	620,0 - 741,6	0,17 - 0,03‰	od ujścia Warty do jeziora Dąbie (rzeka Regalica Szczecin)
<b>Odra graniczna</b>	542,4 - 704,1,0	0,27 - 0,03‰	od ujścia Nysy Łużyckiej do rozwidlenia na Odrę Wschodnią i Odrę Zachodnią w Widuchowej /1/, Granica między Polską a Niemcami



### 3.2 Wezbrania powodziowe na Odrze

Wezbrania na Odrze nie są zjawiskiem wyjątkowym i lokalnie występują prawie każdego roku. Jednakże prawdopodobieństwo wezbrań katastroficznych skutkujących powodzią na całej długości rzeki jest stosunkowo niskie. Zróżnicowanie warunków hydrologicznych poszczególnych odcinków skutkuje zróżnicowanymi przyczynami wystąpienia powodzi (Tabela 2).

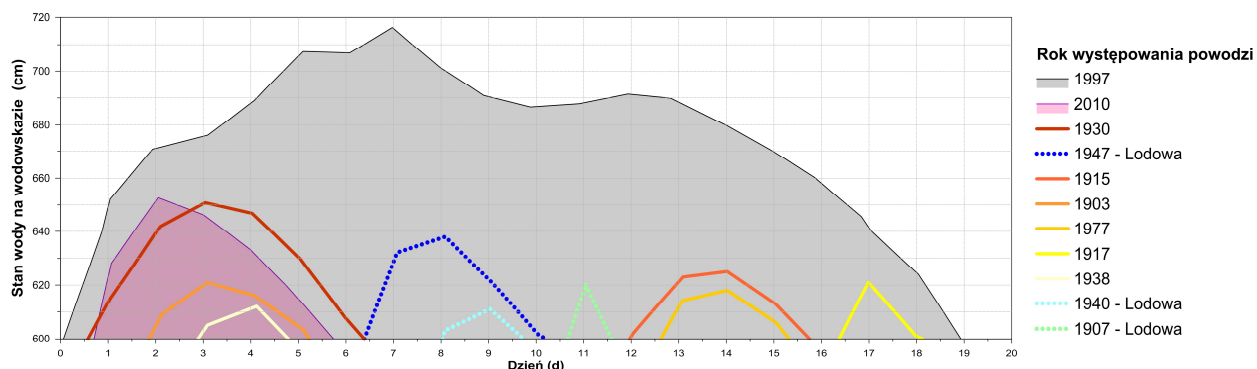
Tabela 2: Główne przyczyny powodzi na Odrze (zmod. z /3/)

Odcinek rzeki	Przyczyny zimą	Przyczyny latem
górną Odra, górną część lewych dopływów	roztopienie lodu	konwekcyjne opady deszczu (nawałnice), wichury z silnymi opadami deszczu,
środkową Odra, Warta	roztopienie lodu	wichury z silnymi opadami deszczu,
dolną Odra	zatory lodowe	wichury z silnymi opadami deszczu, dopływ z Warty, cofka od Zalewu Szczecińskiego

Wezbrania ekstremalne mają miejsce wiosną w wyniku nałożenia się na siebie topnienia śniegu i silnych opadów deszczu. Latem natomiast wywołują je rozległe i ulewne deszcze, których efektem są wezbrania z wysokimi i szybko się koncentrującymi falami. Wezbrania zimowe są cechą szczególną dolnej i środkowej Odry.

Dla wezbrań w Dolinie Dolnej Odry ważną rolę ma dopływ wody z Warty, który stanowi prawie 40% całego przepływu. Na koniec uwzględnić trzeba także stany Zalewu Szczecińskiego, względnie jeziora Dąbie, które mogą hamować odpływ wody i prowadzić do jej dodatkowego napięcia.

Analiza zdarzeń wykazuje, że największe powodzie w XX w. miały miejsce przeważnie latem. Tutaj wymienić trzeba przede wszystkim powódź z lata 1997, którą pod względem wysokości szczytu fali powodziowej, jej trwania i wywołanych strat trzeba zaliczyć do najbardziej ekstremalnych zjawisk powodziowych na Odrze. W przeciwieństwie do tego w przekroju wodowskazowym Eisenhüttenstadt zanotowano wśród 11 największych powodzi XX w. jedynie trzy zimowe przepływy powodziowe (Ilustracja 2) To najbardziej ekstremalne wydarzyło się zimą 1947 powyżej Reitwein w wyniku zatoru lodowego, przy czym działania środkami wybuchowymi dodatkowo niekorzystnie wpłynęły na jego przebieg /6/.

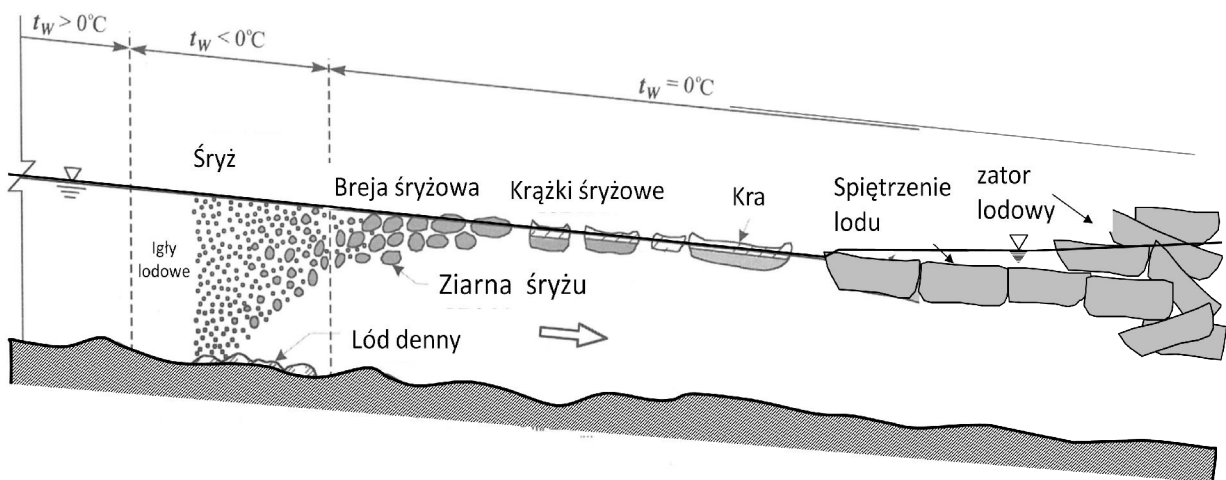


Ilustracja 2: Hydrogramy powodziowe ze szczytami fali wezbraniowej ponad 600 cm w przekroju wodowskazowym Eisenhüttenstadt / Fürstenberg od roku 1901 (dane wg /9/)

### 3.2.1 Powodzie zatorowe na Odrze

Powódź zatorowa to zgodnie z DIN 4049-3 (1994) wezbranie powstałe na skutek nałożenia się na siebie dużej wody i zjawisk lodowych utrudniających odpływ (np. zator lodowy).

W miesiącach zimowych nad Odrę często napływają zimne kontynentalne masy powietrza, co wywołuje zjawiska lodowe. W rejonie ujścia rzeki (Zalew Szczeciński/ jezioro Dąbie) lód tworzy się podobnie jak na wodach stojących, czyli proces zamarzania rozpoczyna się od brzegów. Gdy okres silnych mrozów przedłuża się, poza lodem brzegowym tworzy się także lód denny i śryż (Ilustracja 3), który wypływa na powierzchnię i płynie do momentu, gdy jakaś przeszkoda go zatrzyma (Ilustracja 4). Zbierające się krążki śryżowe zlepiają się i zamarzają tworząc spiętrzenie lodowe (Ilustracja 5). Gdy napływająca kra natrafi na przestrzeń pokrytą lodem, wciska się zarówno pod jak i nad istniejącą barierę lodową. Warstwa lodowa staje się coraz grubsza, a przekrój przepływu maleje, co prowadzi to powstania tak zwanego zatoru lodowego. Zator lodowy piętrzy wodę, a zwierciadło wody w rzece podnosi się.



Ilustracja 3: Powstawanie lodu w cieku płynącym, który oziębia się do temperatury poniżej 0°C (zmod. z Michel, 1971 w /7/)



Ilustracja 4: Krążki śryżu i lód brzegowy na Odrze 2011 (fot.: Schieberle w /6/)



Ilustracja 5: Pokrywa lodowa we Frankfurcie nad Odrą 2009 (fot.: Schuh w /6/)

Na Odrze górnej i środkowej zatory lodowe tworzą się najczęściej w przekrojach jazów. Na dolnej Odrze powstawaniu zatorów lodowych sprzyja pokrywa lodowa na jeziorze Dąbie, które zamarza wcześniej niż Odra. Dolna Odra generalnie ma niekorzystne warunki do spływu kry, czego powodem jest niski spadek podłużny i niska prędkość przepływu.

Potencjalnie największe szkody powodziowe nad Odrą powstają, gdy nałożą się na siebie wysokie przepływy zimowe i wczesno-wiosenne, jak to miało miejsce w dotychczas największej powodzi zimowej w połowie marca 1947. Na wyżynnym obszarze zlewni leżało jeszcze dużo śniegu, którego roztop wywołany wzrostem temperatury oraz dodatkowo opady deszczu poskutkowały ekstremalnymi stanami wód /3/. Spiętrzenia i wylewy wody oraz mechaniczne niszczenie wałów wywołane nawałem kry czynią z groźnie wielkiej wody wezbranie katastrofalne.

Dane historyczne ukazują, że powodzie zatorowe występują między początkiem grudnia a początkiem kwietnia. Statystycznie w ostatnich 100 latach pokrywa lodowa tworzyła się mniej więcej co 2 lata na przestrzeni od Zalewu Szczecińskiego do ujścia Nysy Łużyckiej /3/. Zwłaszcza zanieczyszczenia i wzrost temperatury wody w rzece, wywołany odprowadzaniem do rzeki wód chłodniczych, poskutkowały od początku lat 70-tych skróceniem się okresu występowania pokrywy lodowej (LUA, 1994 w /3/). Modernizacje elektrowni Dolna Odra położonej powyżej Gryfina doprowadziły w ostatnich latach do zmniejszenia się ilości oddawanego do Odry ciepła (Kreft i Woś, 2007). Zmniejszył się więc także redukujący wpływ elektrowni zarówno na samo występowanie zjawisk lodowych jak i na czas ich trwania.

Gdy okres mrozów kończy się, poniżej miejsc zrzutu wody i przy głowach ostróg tworzą się wolne od lodu rynny, które są wstępem do samoczynnego ustępowania lodów. Lody pękają i powstaje kra, która spływa w dół rzeki. Dlatego ważnym jest, by pokrywa lodowa na Zalewie Szczecińskim i na jeziorze Dąbie roztopiała się w odpowiednim czasie, a kra mogła spływać bez przeszkód nie wywołując groźby powstania zatoru (LUA, 1994 w /3/).

### 3.3 Warunki hydrologiczne dolnej Odry

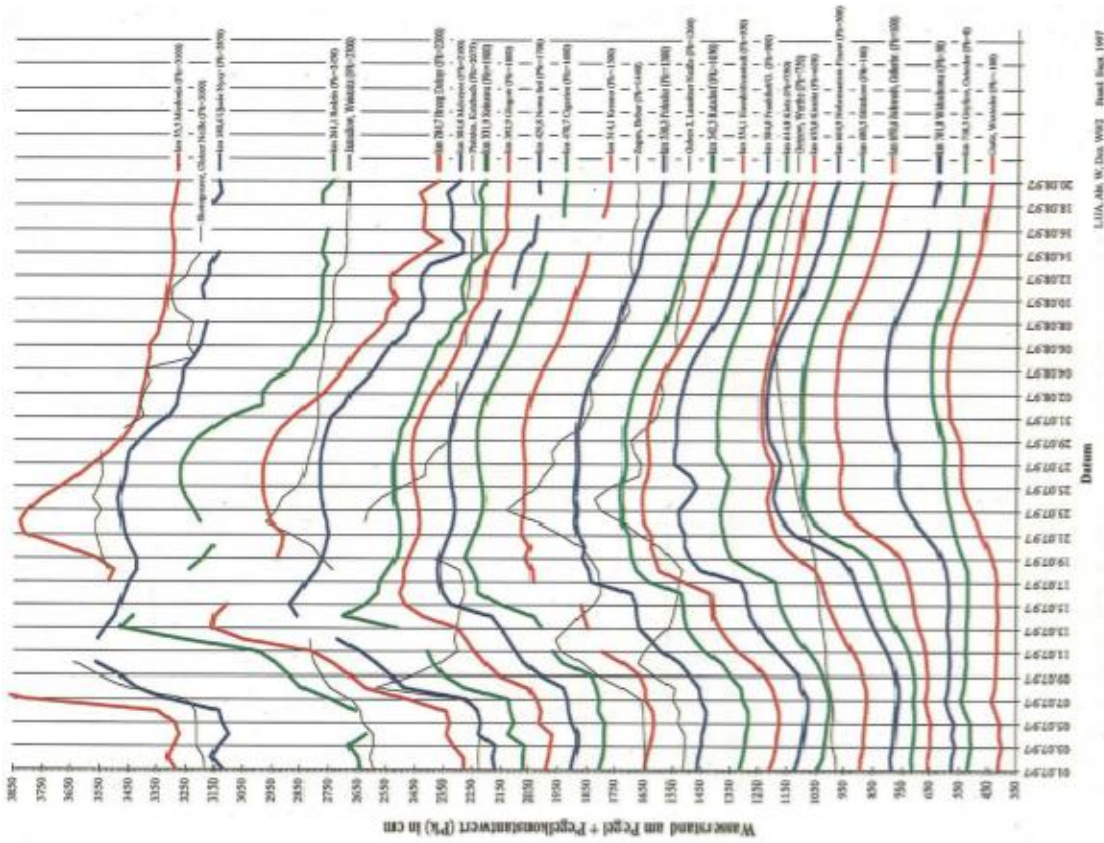
Dopływy Odry w jej dolnym biegu pochodzą w większości z terenów nizinnych, gdzie opady letnie z reguły nie wywołują wezbrań z wysoką falą powodziową.

Zasadniczo schodzące z góry fale powodziowe docierają do doliny dolnej Odry w formie spłaszczonej i ulegają tu dalszemu spłaszczeniu. Zależność tę widać dobrze, gdy zestawie się hydrogramy z wodowskazów między Miedonią a Gartzem (Ilustracja 7), co przedstawiono na ilustracji 7 odnośnie powodzi 1997, a na ilustracji 8 odnośnie powodzi 2010.

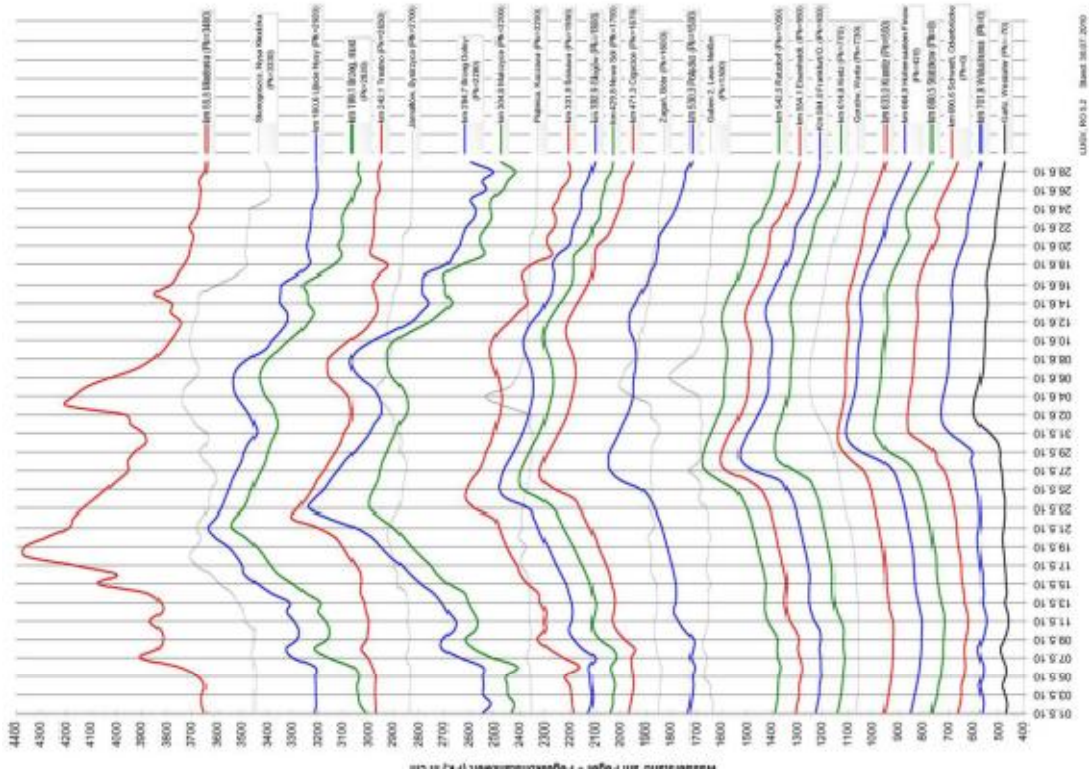


Ilustracja 6: Zestawienie ponadregionalnych wodowskazów Odry (z /9/)

Podczas powodzi 1997 wały przeciwpowodziowe powyżej Frankfurtu nad Odrą zostały w wielu miejscach przerwane, co na hydrogramie w przekroju wodowskazowym Eisenhüttenstadt widoczne jest w formie wahań, a w przekroju wodowskazowym Frankfurt nad Odrą jako skok w krzywej wykresu /8/. Przerwania wałów i związane z tym zalania spowodowały, że w ciągu 2 dni stan wody okresowo obniżył się o około 75 cm na wodowskazie Frankfurt nad Odrą i o około 25 cm na wodowskazie Hohensaaten-Finow, zanim stan wody znowu podniósł się, by 27 lipca osiągnąć stan kulminacyjny fali głównej (Ilustracja 7).



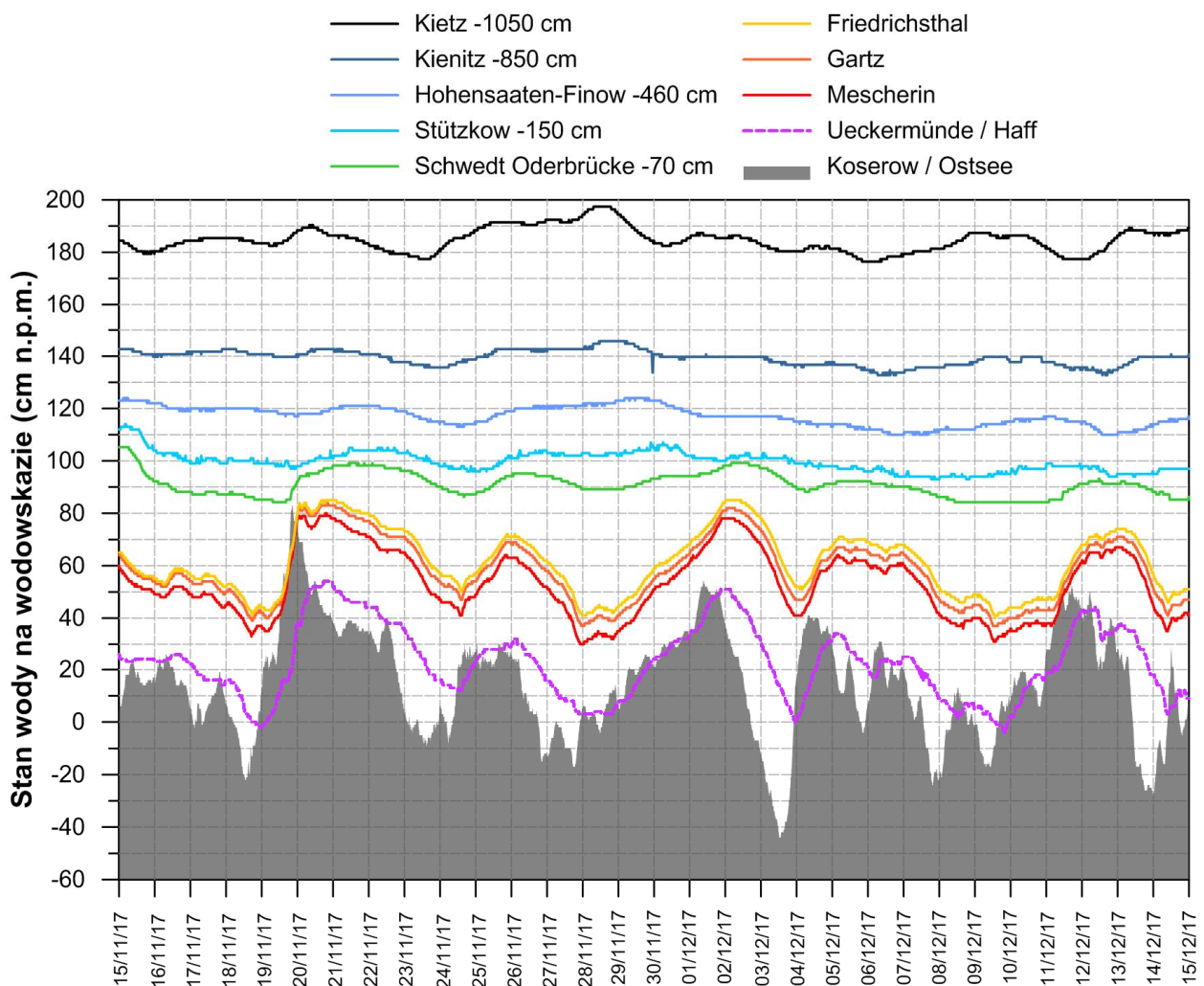
Ilustracja 7: Hydrogramy powodzi letniej na Odrze w roku 1997 (z /8/)



Ilustracja 8: Hydrogramy powodzi letniej na Odrze w roku 2010 (z /9/)

Znaczącą rolę odegrała tu rozległa na ok. 55 km<sup>2</sup> terasa zalewowa Ziltendorfer Niederung. Dlatego w planie zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry Kraju Związkowego Brandenburgia obszar ten zaliczony jest w regionie „O1 - Oder od Ratzdorf do Hohensaaten” jako polder zalewowy. Potencjał retencyjny terasy Ziltendorf określono w tym dokumencie na 130 mln m<sup>3</sup> (Kod O1\_0001\_00005 patrz: [http://www.lfu.brandenburg.de/media\\_fast/4055/O1\\_Massnahmenliste.pdf](http://www.lfu.brandenburg.de/media_fast/4055/O1_Massnahmenliste.pdf)). Jednakże rozchodzi się tutaj – w przeciwieństwie do Międzyodrza – o dodatkową powierzchnię zalewową, znajdującą się na zawalu, a tym samym poza korytem przepływu powodziowego (patrz rozdział 5.2). Także uwarunkowania hydrauliczne tej terasy nie są identyczne z panującymi na Międzyodrzu.

Stany wody na dolnej Odrze zależą od stanów Bałtyku i od panujących tam warunków atmosferycznych (wiatr i ciśnienie atmosferyczne). Są to parametry decydujące o położeniu zwierciadła wody i zasięgu nadpiętrzenia wody, docierającego nawet do 100 km powyżej Szczecina. Na Ilustracja 9 zestawiono dane wodowskazowe Bałtyku, Zalewu Szczecińskiego i Ody do wodowskazu Kietz (Ilustracja 6) z okresu listopad – grudzień 2017.



Ilustracja 9: Porównanie stanów wody na Bałtyku, Zalewie Szczecińskim i dolnej Odrze przy MQ około 750 m<sup>3</sup>/s (dla lepszego zobrazowania niektóre stany zostały pomniejszone o jednakową wartość (źródło danych: /13/)

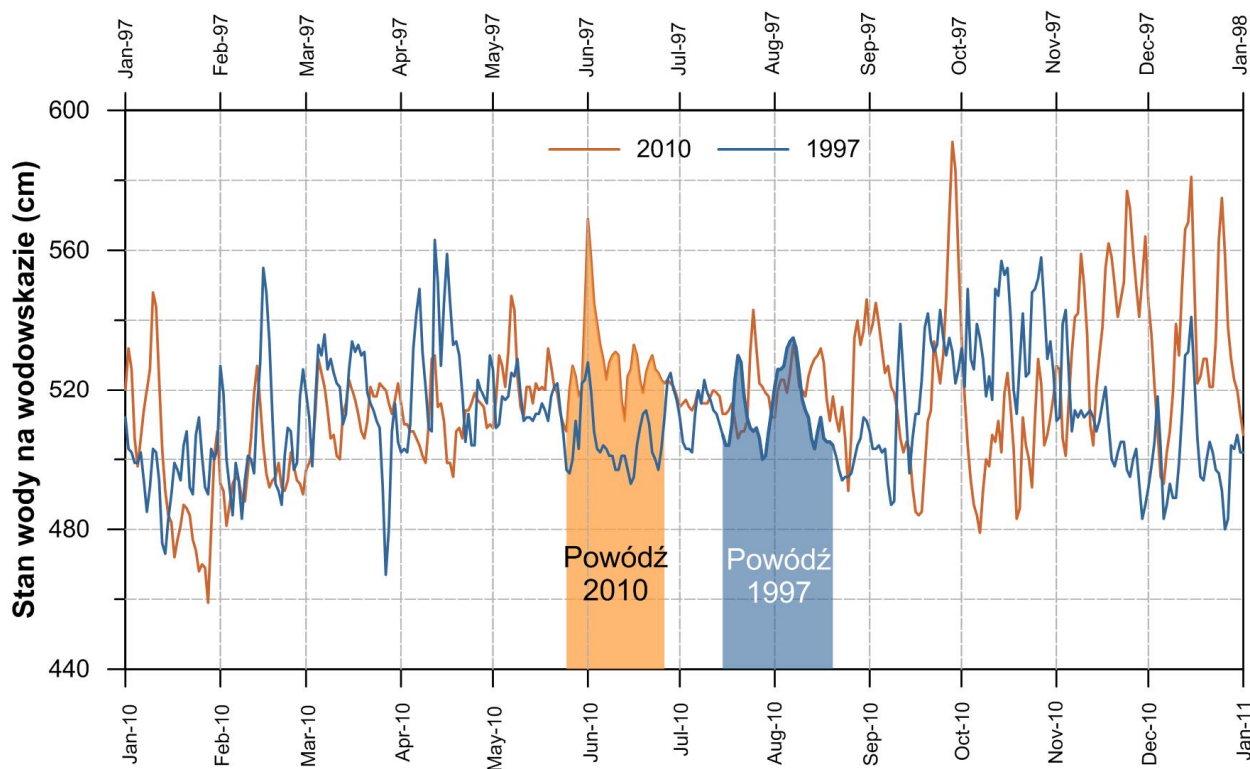
Z zestawienia w Ilustracja 9 wynika co następuje:

- Stany wody na Bałtyku są niezwykle dynamiczne. W hydrogramie zaznaczają się zarówno wpływy pływów morza jak i wiatru oraz ciśnienia atmosferycznego.
- Na Zalewie Szczecińskim wahania stanów wody są w porównaniu z Bałtykiem mniejsze i pojawiają się tam z kilkugodzinnym opóźnieniem. Zalew Szczeciński ma zatem oddziaływanie buforujące na wpływ stanów morza.
- Stany wody na dolnej Odrze do wysokości Friedrichsthal zależą od stanu wody na Zalewie Szczecińskim. Na przestrzeni wybranego okresu wahania stanu wody wynoszą tu około  $\pm 30$  cm, czyli prawie tyle samo co na Zalewie Szczecińskim. Tutaj nie ma więc kolejnego oddziaływania buforującego.
- Wpływ stanów wody na Zalewie Szczecińskim odnotowują hydrogramy wodowskazów do wysokości Schwedt. Zanotowane tam wahania stanu wody wynoszą  $\pm 10$  cm czyli są znacząco mniejsze, a ich dynamika jeszcze bardziej osłabiona.
- Powyżej Schwedt oddziaływanie buforujące jest bardziej wykształtowane, a stany wody w coraz większym stopniu zależą od natężenia przepływu. Wpływ stanów wody na Zalewie Szczecińskim jest rejestrowany już tylko w przypadku zmian o dużej wartości, jak np. w przypadku obniżenia stanu wody pomiędzy 20. a 24.11.2017.

Podsumowując trzeba stwierdzić, że dolna Odra jest kompleksowym systemem hydraulicznym, który cechują podpiętrzenia wody i na który wpływ mają zarówno stany Bałtyku jak i przepływ oraz hydrauliczna szorstkość (opory ruchu w korycie) Odry.

### 3.4 Stany wody dolnej Odry w latach 1997 i 2010

Poniżej w oparciu o dane wodowskazowe zbadana zostanie zależność pomiędzy stanem wody na Bałtyku a przepływem powodziowym na Odrze. Najpierw porównane zostaną (Ilustracja 10) hydrogramy powodzi letnich z lat 1997 i 2010 z wodowskazu Ueckermünde na Zalewie Szczecińskim.



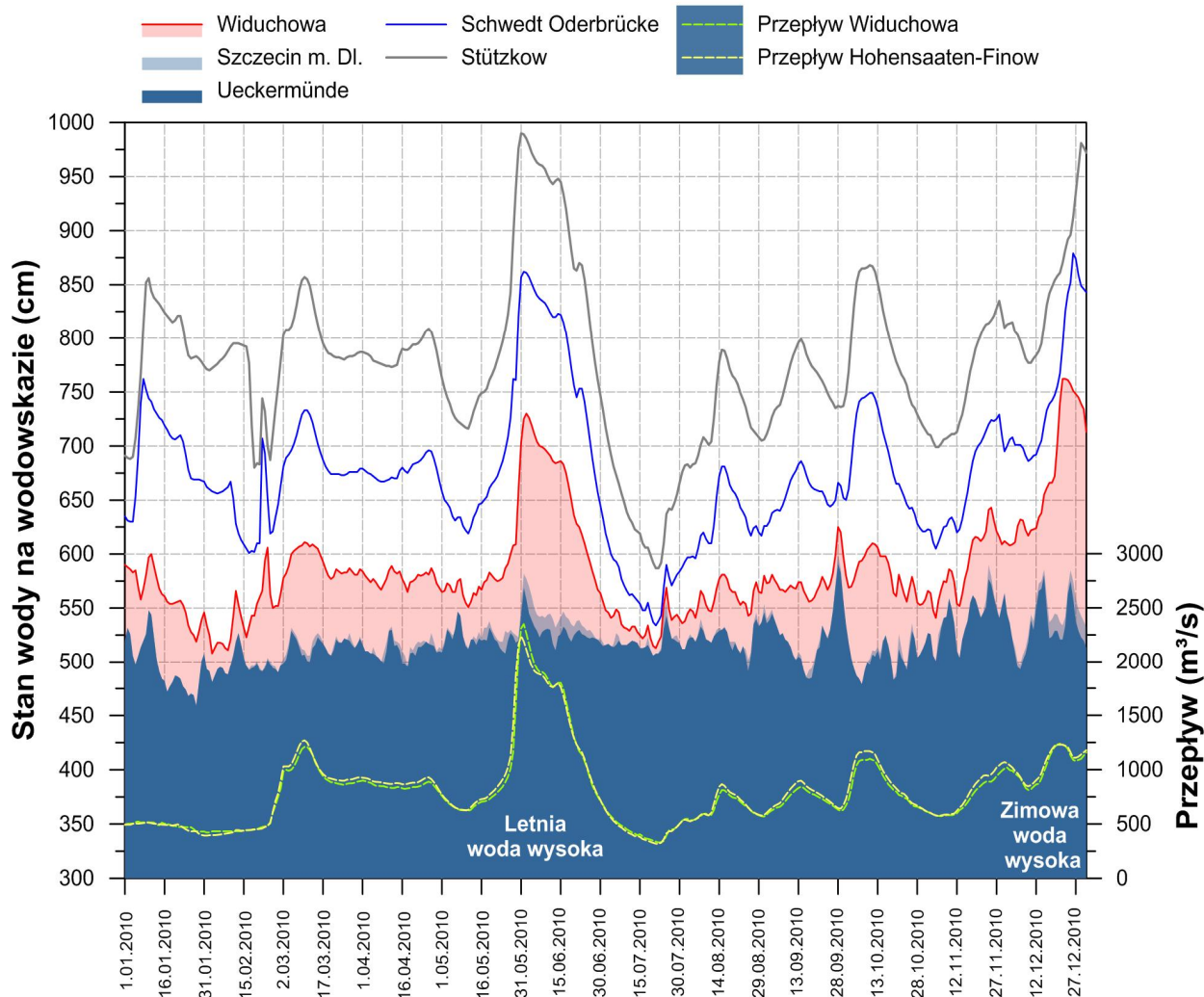
Ilustracja 10: Hydrogramy roczne lat 1997 i 2010 w przekroju wodowskazowym Ueckermünde (Stettiner Haff). Kolorem zaznaczono okres wezbrania powodziowego dla poszczególnego roku (źródło danych: /10/)

Bezpośrednie zestawienie pokazuje, że stany wody na Zalewie Szczecińskim były podczas powodzi w roku 2010 bardziej niekorzystne niż to miało miejsce podczas powodzi 1997. Z jednej strony średni stan wody był nieco wyższy, a z drugiej miała miejsce ostra kulminacja na początku 2010. Pomimo korzystniejszych warunków na Zalewie, powódź w roku 1997 była w całym obszarze zlewni groźniejsza w skutkach niż to miało miejsce w 2010 roku.

Wyraźne staje się też, że stany wody na Zalewie podczas powodzi nie były wyjątkowe i nie wykazywały tego samego okresu powtarzalności, jaki przyporządkowano przepływom powodziowym na Odrze (np. w Stützkow HQ<sub>60</sub>, czyli okres powtarzalności 60 lat).

Dla lepszego zobrazowania zestawiono na ilustracji 11 hydrogramy kilku polskich i niemieckich wodowskazów z Hohensaaten-Finow i z Widuchowej w roku 2010 z uwzględnieniem wezbrania powodziowego.





Ilustracja 11: Stany i przyptywy z roku 2010 mierzone na wodowskazach dolnej Odry i Ueckermünde / Zalew Szczeciński (źródło danych: /10/ /11/)

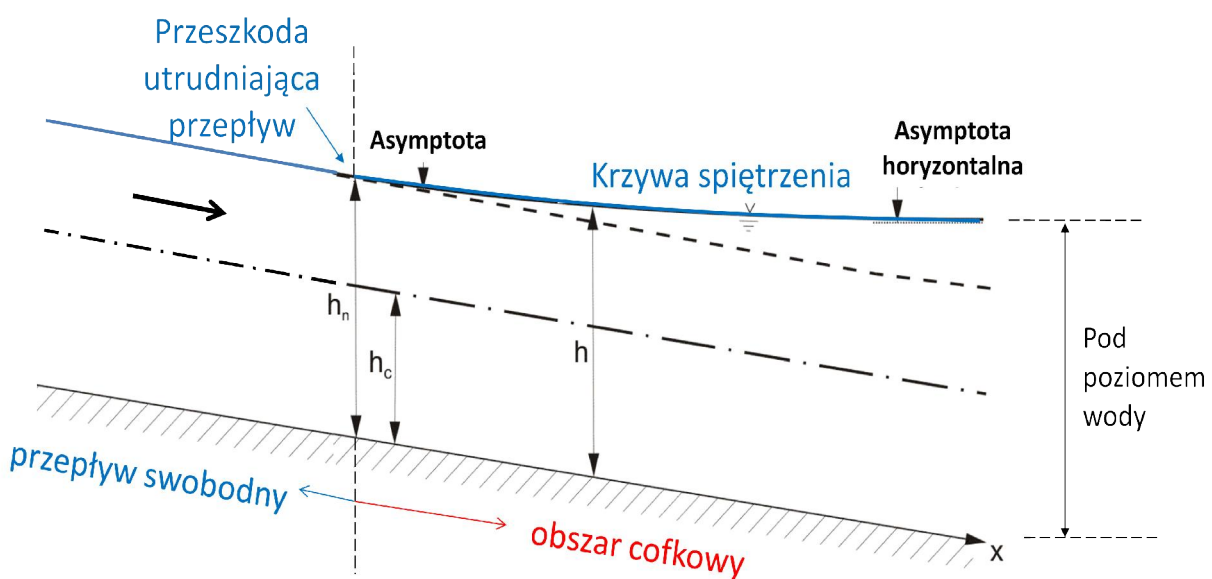
Odnosnie wzajemnego oddziaływania na siebie stanu wód na Zalewie Szczecińskim i na Odrze następują różnice się między sobą sytuacje:

- Hydrogramy każdego analizowanego wodowskazu podczas powodzi 2010 kształtowane są przez natężenie przepływu. Osiągnięcie przez falę kulminacyjną Jeziora Dąbie i Zalewu Szczecińskiego odbiło się na stanie wód, który 01.06. podniósł się tam o około 50 cm.
- 28.09.2010 przy malejącym odpływie doszło na Zalewie do wysokiej kulminacji, która miała wyraźny wpływ na stany wody na Odrze, co wyraźnie widać na hydrogramie w przekrojach Widuchowej, Schwedt a nawet Stützkow.
- Pomiędzy 22. a 24.02.2010 miała miejsce krótka kulminacja na wodowskazach między Widuchową a Stützkow, która związana była najprawdopodobniej ze spiętrzeniem lodowym przy już trwającym pochodzie lodów (pęknięcie pokrywy lodowej na Jeziorze Dąbie rozpoczęło się 02.02.2010, patrz /6/, str. 152). Nie wpłynęło to jednak na stany wody na Zalewie Szczecińskim (Ueckermünde).

### 3.5 Warunki hydrologiczne na dolnej Odrze

Cechą charakteryzującą Odrę powyżej Szczecina są podpiętrzające wodę cofki. Zasięg wpływu cofek to mniej więcej 100 km w górę rzeki od Szczecina, co potwierdzają dane wg Buchholz (2007). Przyjmuje się, że zasięgiem maksymalnym deformującym przepływ zjawisk odmorskich jest wodowskaz Gozdowice, a poniżej tego przekroju nie można mówić o krzywych natężenia przepływów niezdeformowanych przez wpływy odmorskie.

Z hydraulicznego punktu widzenia krzywa przepływów na dolnej Odrze – ze względu na niskie spadki podłużne – rozkłada się na dwie asymptoty. Jedną asymptotą jest położenie zwierciadła wody górnej wolno płynącego odcinka rzeki. Druga asymptota jest praktycznie pozioma i odpowiada horyzontalnemu położeniu zwierciadła wody w jeziorze Dąbie (Ilustracja 12).



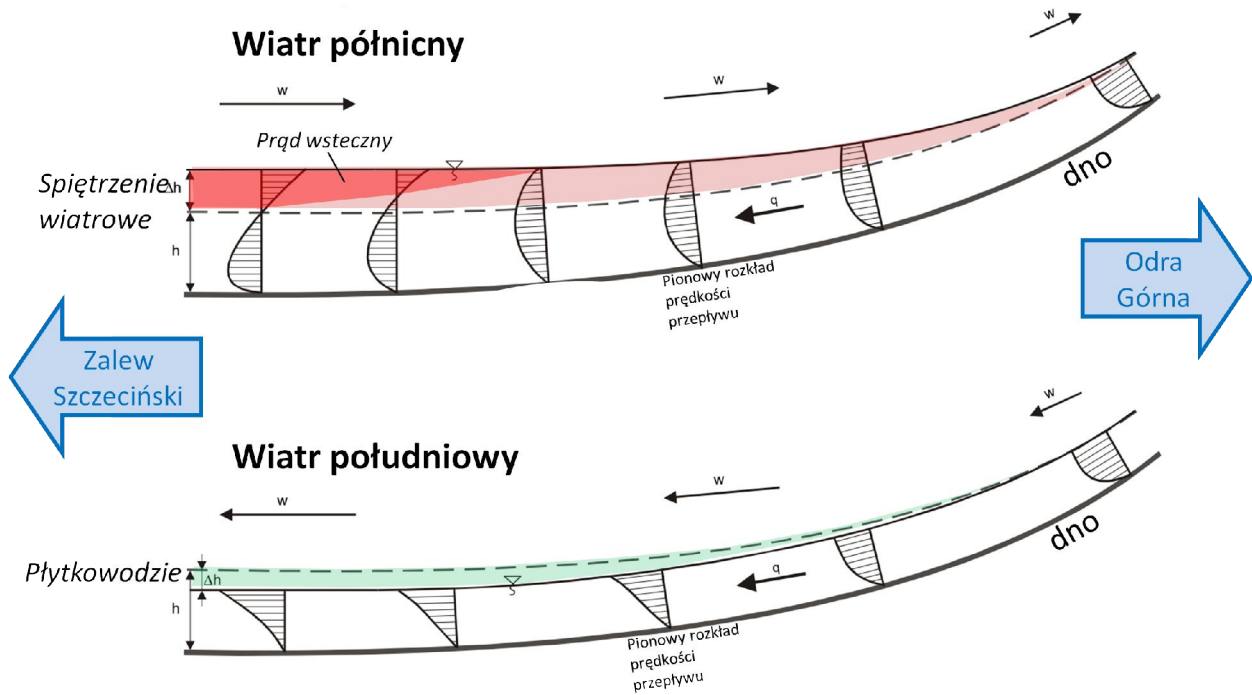
Ilustracja 12: Położenie zwierciadła wody (typ „M1”) przy podpiętrżonym przepływie i małym spadku podłużnym

#### 3.5.1 Cofki wiatrowe na Odrze

Wpływ wiatru na powierzchnię zwierciadła wody w Odrze jest raczej niewielki. Tylko przy wystarczająco długim okresie oddziaływania może poskutkować podpiętrzeniem lub obniżeniem zwierciadła wody (Ilustracja 13). Możliwe jest to tylko wtedy, gdy kierunek wiatru jest równoległy do cieku, tzn. podpiętrzenie przy wiatrach z północy i obniżenie przy wiatrach z południa. Dodatkowo wiatr musi wiać dostatecznie długo.

Oddziaływanie wiatru zmienia także pionowe rozkłady prędkości przepływu wody. Przy dużej prędkości wiatru i silnej cofce wiatrowej wywołane mogą zostać nawet np. prądy wsteczne w Odrze.

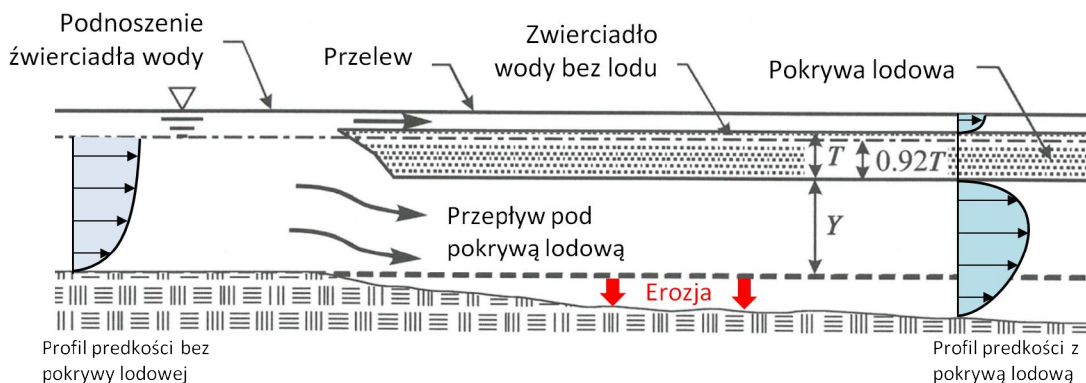
Nałożenie się na siebie powodzi i długich i silnych wiatrów z północy jest jednakże mało prawdopodobne (Buchholz, 2007).



Ilustracja 13: Schemat cofki wiatrowej na dolnej Odrze (zmod. z Buchholz, 2007)

### 3.5.2 Hydrauliczne skutki zjawisk lodowych

Tworzenie się pokrywy lodowej na powierzchni zwierciadła wody ma znaczący wpływ na przepływ w nurcie cieku. Tworzy ona dodatkową powierzchnię i oznacza, że na wodę działa dodatkowe tarcie. Poprzez ogólnie większe straty energii zmniejsza się prędkość, a poziom zwierciadła wody się podnosi. Na odcinku Odry granicznej przyrost stanów wody - w zależności od przepływu - wynosi z reguły od 0,80 m do 1,50 m (LUA, 1994 w /3/, str. 32). Zmienione warunki przepływu mogą lokalnie doprowadzić do erozji dna, co schematycznie przedstawia Ilustracja 14.

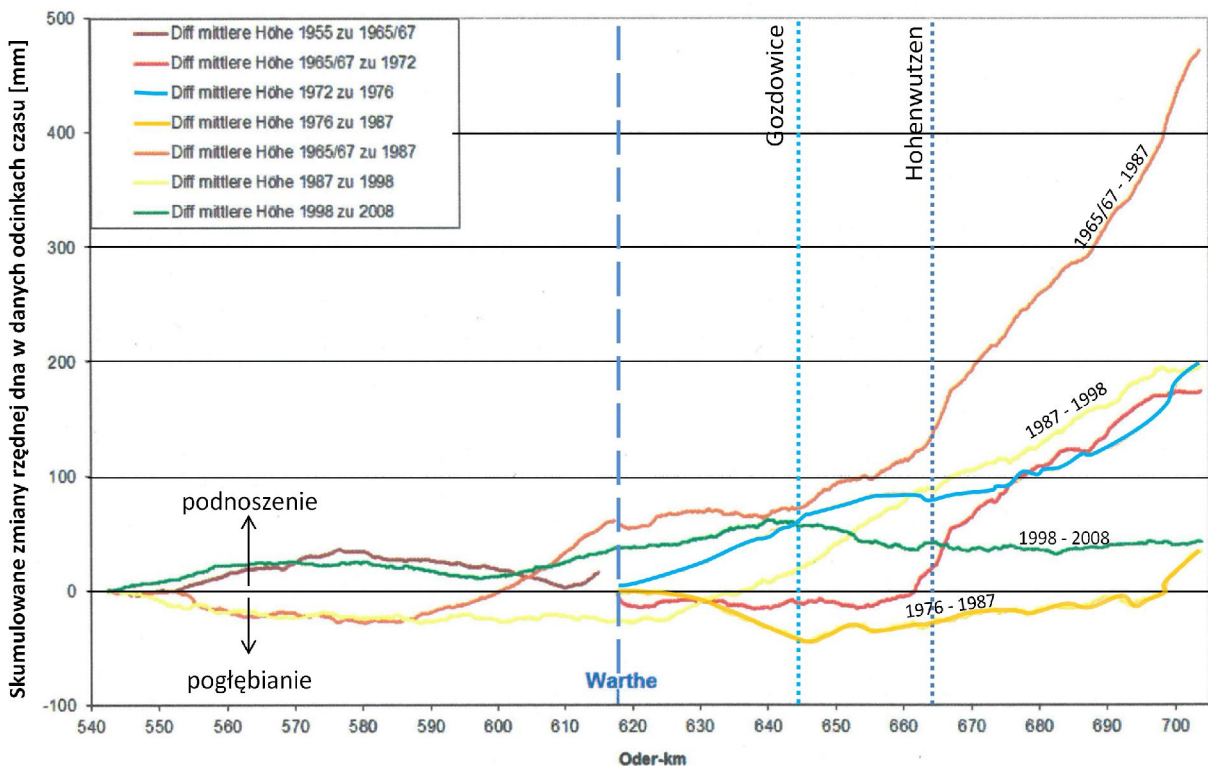


Ilustracja 14: Hydrauliczne konsekwencje tworzenie się pokrywy lodowej (zmod. z /7/)

## 4 Morfologia Odry

### 4.1 Rozwój dna

Odra jest jedną z ostatnich wielkich rzek w Europie Środkowej, która w swoim dolnym biegu w dalszym ciągu może płynąć swobodnie i nie jest regulowana stopniami wodnymi. W związku z tym zachowane zostały tu w dużym stopniu naturalne warunki przepływu, naturalna dynamika stanów wód oraz ciągłość morfologiczna z niezakłóconym transportem osadów. Bilans rumowiska jest zrównoważony, nie występuje ani deficyt rumowiska, ani tendencja do ściągania okładziny dennej, jak to ma miejsce w przypadkach cieków uregulowanych [15/].



Ilustracja 15: Zmiany rzędnej dna pomiędzy dwoma pomiarami (zmod. z [15/])

Mały spadek podłużny powoduje, że unoszone przez rzekę osady gromadzą się zwykle właśnie w dolnym jej biegu. Ilustracja 15 ukazuje w przekrojach pionowych rozwój dna Odry granicznej w różnych okresach. Podstawą są dane z sondowań, które BfG „[...]” przyjmuje za najpełniejszą i niezawodną podstawę do opisu rozwoju koryta Odry granicznej w ostatnich dziesięcioleciach.“ [15/, str. 68]

Wykresy na Ilustracja 15 prowadzą do następujących wniosków ([15/, str. 68 i nast.):

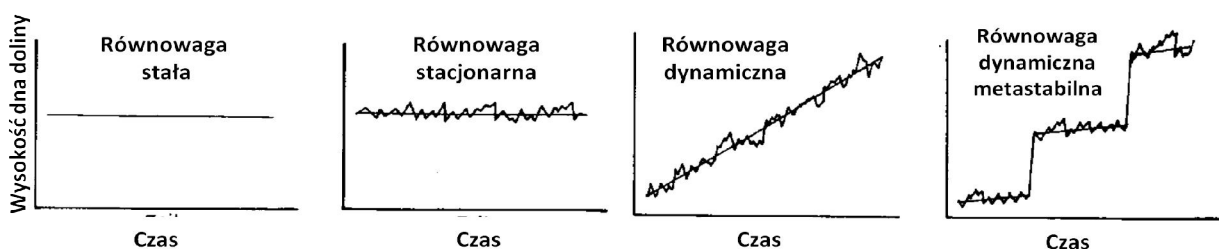
- Powyżej ujścia Warty (km 542 - 590) nastąpiło odwrócenie tendencji. Do połowy lat 60-tych trwała tendencja podnoszenia się dna, która między 1967 do 1987 odwróciła się i dno zaczęło się pogłębiać, co trwało do roku 1998. Od tego czasu zauważalna jest ponownie tendencja do podwyższania się dna. Zmiany wysokości, a więc pogłębienie lub podwyższanie się dna, liczą na odcinku powyżej ujścia Warty zawsze 20 mm pomiędzy dwoma sondowaniami, czyli w przeliczeniu **1 - 2 mm rocznie**.

- Poniżej ujścia Warty trwa tendencja akumulowania się osadów i podnoszenia się dna cieków. Nasila się ona wraz z biegiem rzeki i zmniejszającym się spadkiem podłużnym. Najsilniejsza akumulacja osadów miała miejsce w okresie 1965/67 – 1987 i wynosiła do 480 mm, co odpowiada wartości **25 mm rocznie**.
- Pomimo tego w niektórych okresach nastąpiło także pogłębienie się dna. Tutaj zaliczają się lata 1976 - 1987 oraz 1965/67 – 1972, w okresie których odcinek między Gozdowicami i Hohenwutzen pogłębił się o 5 - 40 mm. Odpowiada to wartości **1 - 4 mm rocznie**.
- W ostatnim z badanych okresów, lata 1998 – 2008, tendencja podwyższania się dna ustabilizowała się, wynosi już tylko 50 mm, czyli w przeliczeniu **4 - 5 mm rocznie** i wykazuje zrównoważony charakter na całym odcinku poniżej ujścia Warty.

Analizy te prowadzą BfG do następujących wniosków: „*Ostatnie dziesięciolecie [Uw. a.: 1998 - 2008] odznacza się zrównoważonym rozwojem dna, które potwierdzają zmiany poziomu zwierciadła wody. [...] Silna tendencja nakładania się warstw [uw. a.: na odcinku od Hohenwutzen, w rejonie oddziaływania cofki odmorskiej] w międzyczasie straciła na sile, a cały system zdaje się znajdować się w mniejszym lub większym stopniu w stanie morfologicznej równowagi. Na przestrzeni wszystkich ostatnich lat odnosi się to także do całego odcinka Odry granicznej.*“ [15/, S. 70]

#### 4.1.1 Wpływ przepływów powodziowych na kształt form dennych

Powodzie mają wpływ na kształt dna. Jednak ze względu na fakt, że sondowanie dna przeprowadza się rzadko, często nie ma możliwości pomiaru, jaki rzeczywisty i bezpośredni wpływ na rozwój dna mają wezbrania powodziowe. Dlatego pozostaje kwestią otwartą, czy stosunkowo krótkotrwałe zdarzenia powodziowe nie oddziałują znacząco także na długookresowy rozwój dna w rozumieniu dynamicznej, metastabilnej równowagi dna wg Chorleya czy Kennedyego (1971).



Ilustracja 16: Morfologiczne stany równowagi wg Chorley'a i Kennedy'ego (1971)

KRC opisuje wpływ powodzi na dno Odry następująco: „*Do około roku 2000 na odcinku 2 od km 630 do km 660 rzeki Odry obserwowano wyraźne podniesienie dna. Wyniosło ono od lat 50-ych około 50 cm i jest potwierdzone poprzez sondowania dna, ujęcia położenia zwierciadła wody i analizy stanów z wodowskazów (Hüsener et al, 2010; [12], [17], [23]). Od około roku 2000 lub od czasu po nietypowo intensywnej powodzi z roku 1997 podwyższenie to wydaje się być zjawiskiem zatrzymanym. Nowe dane z natury pokazują w dalekim stopniu stabilne średnie położenie wysokościowe dna Odry [...]*“ [1/, S. 97]

## 4.2 Formy denne koryta

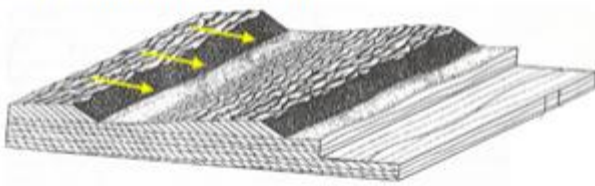
Osady w dolnej Odrze od Hohensaaten, tworzą w przeważającej części piaski o średnicy ziarna poniżej 1,0 mm. Nawet niewielka prędkość przepływu wprawia w ruch piasek o takiej ziarnistości, na skutek czego przemieszcza się on wraz z nurtem. Piaszczyste dna cieków tworzą przy tym charakterystyczne dla nich formy, określane mianem form dennych koryta (mezofomy korytowe). Rozróżnia się tu ryfle (długość do 0,3 m przy średnicy ziaren poniżej 0,6 mm), diuny (długość to mniej więcej 6-krotność głębokości cieku, wysokość mniej więcej do 1/3 głębokości cieku) i w końcu ławice (łachy) piasku (przemieszczające się między prawym i lewym brzegiem, długość  $\gg$  szerokość cieku). Odnośnie form dennych w korycie Odry raport BfG /15/ podaje następujące dane (Steiner, 2007), które opierają się na badaniach na modelu fizycznym:

- diuny: wysokość 0,1 - 1,7 m, a długość 2 - 40 m
- diuny duże: wysokość do 1,6 m, a długość 40 - 100
- ławice piasku: długość 370 - 450 m

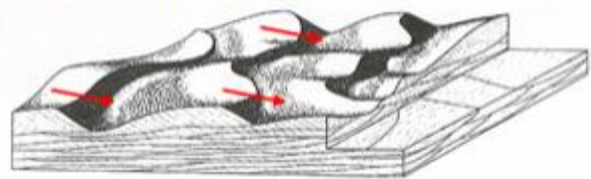
Diuny poruszają się znacznie wolniej niż nurt. Małe diuny o wysokości ok. 0,3 m przemieszczają się z prędkością mniej więcej 2 - 2,5 m/h /15/. Odpowiada to około jednej tysięcznej prędkości przepływu. Prędkość dużych diun wynosi 1,5 m/dobę (z /15/), czyli przemieszczają się one jeszcze wolniej. Odpowiada to prędkości przepływu podzielonej przez 50.000 (0,02 ‰).

Ponieważ diuny przemieszczają się wolno, więc w porównaniu do prędkości transportu materiałów stałych w cieku o płaskim dnie, transport ten odbywa się wolniej, co oznacza, że diuny oddziałują na dno stabilizująco. Niemniej formy denne nie są niezmiennie ani w przestrzeni, ani w czasie. Co więcej różne formy denne występują równoległe, a ich zróżnicowana prędkość poruszania się powoduje, że nakładają się na siebie. Dlatego w Odrze transformujące się formy denne mogą być trójwymiarowe. (Ilustracja 17, Ilustracja 18).

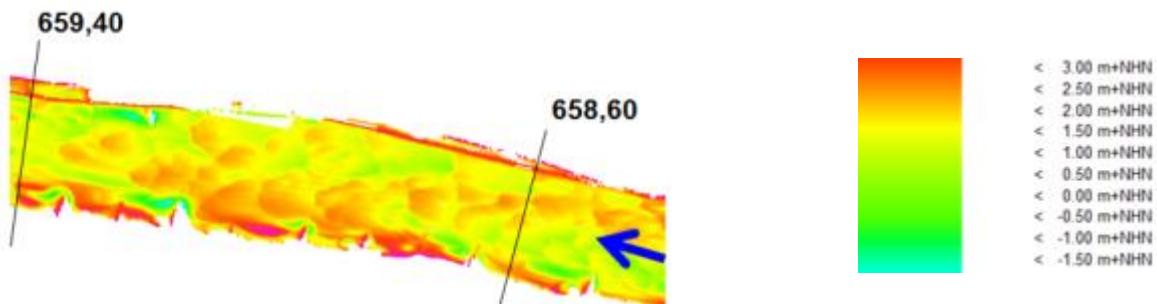
Diuny dwuwymiarowe (2D)



Diuny trójwymiarowe (3D)



Ilustracja 17: Dwuwymiarowe i trójwymiarowe diuny (z Reineck i Sing, 1975)



Ilustracja 18: Trójwymiarowa struktura diun w stworzonym przez BAW fizycznym modelu Odry (z /1/)

Dla regularnych diun o strukturze dwuwymiarowej stworzono podstawy do określania ich geometrii, które dobrze się sprawdzają w praktyce (w Raudkivi, 1976, por. rozdział 4). Jednakże nawarstwienia trójwymiarowe nie pozwalają na precyzyjne wyliczenia wysokości dna/głębokości wody dla danego miejsca w danym czasie. Także opis statystyczny: określający np. średnią wysokość wraz z wielkością wahań nie da się łatwo sporządzić.

Nie jest wiadome na ile zjawiska lodowe zmieniają geometrię form dennych, przez to obliczenia w tym aspekcie są nie możliwe do wykonania.

#### 4.2.1 Łachy piasku jako siedliska dla organizmów żywych

Diuny tworzą się przy średnio silnym nurcie, którego moc określa się np. przez denne naprężenie ścinające i prędkość przepływu. Gdy oddziaływanie hydrauliczne nasila się, coraz więcej piasku ulega dyspersji i transportowany jest jako rumowisko unoszone – diuny zostają sukcesywnie rozmyte. Odwrotność tej zasady oznacza, że diuny tworzą się na nowo, gdy prędkość nurtu maleje, co prowadzi do wyrównywania dna. Zanik diun jest więc zjawiskiem czasowym. W chwili gdy siła nurtu spada poniżej poziomu średniego, a ilość osadów jest dostateczna, rozpoczyna się ponownie proces akumulowania się osadów.

Diuny tylko wówczas posiadają strefę bentosu, gdy są stosunkowo statyczne. W innym przypadku tylko bardzo dobrze przystosowane i małe organizmy potrafią je zasiedlić. Przykładem są tu larwy ochotkowatych (rodzina muchówek) (Amsler et al., 2009), które poprzez absorpcję ziaren piasku zwiększają wagę własną i chronią się tym sposobem przed dryfowaniem z nurtem.

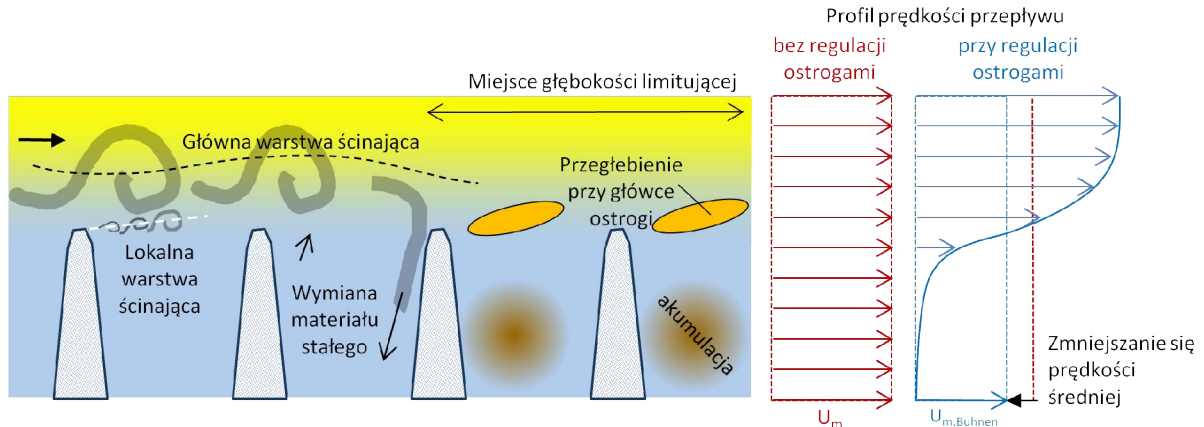
Na tarło, np. siei (*Coregonus maraena*) między grudniem a kwietniem, nadają się także tylko takie formy denne, które są stosunkowo stabilne. W innym przypadku diuna nawarstwia się na złożoną ikrę, a niedobór tlenu powoduje jej gnicie (informacja ustna C. Wolter, IGB Berlin). Wzrost dynamiki form dennych skutkowałby więc pogorszeniem się warunków tarła i zmniejszeniem się ilości narybku.

Obok swoich funkcji siedliskowych formy denne odgrywają także dużą rolę w samooczyszczaniu się cieku. Woda przepływa przez naniesione osady i jest przeciskana przez nie jak przez filtr. Przelfiltrowanie to odbywa się zarówno w sensie mechanicznym poprzez przepływanie przez ziarna piasku, jak i w sensie biochemicznym, gdyż przestrzeń w porach zasiedlana jest przez różnorodne bakterie. Dzięki temu materia organiczna zostaje skutecznie zatrzymana w systemie i mikrobiologicznie rozłożona. Fundamentalne znaczenie tego procesu dla funkcji samooczyszczania się rzeki udało się udowodnić w przypadku Łaby, której formy denne mają podobną jak w Odrze geometrię (Fischer et al., 2006).

### 4.3 Mechanizm działania ostróg

Zasadniczo oddziaływanie ciągu ostróg i pól międzyostrogowych na ciek da się zreasumować następująco:

- Ostrogi zmniejszają główny przekrój przepływu cieku.
- W efekcie prędkość przepływu rośnie w głównym nurcie, a maleje w polach międzyostrogowych (Ilustracja 19).
- Ostrogi zwiększają turbulencje w rzece, co powoduje większe tarcie.
- Średnia prędkość przepływu w całym przekroju (ostrogi i koryto) ulega generalnemu zmniejszeniu, przez co zwierciadło wody w cieku podnosi się.
- Zwiększona prędkość przepływu i wyższy poziom zwierciadła wody prowadzą do wzrostu naprężenia ścinającego i związanej z tym tendencji do powstania przegłębienia w przekroju przepływu głównego koryta.
- Przegłębienia prowadzą do odkładania się materiału dennego w polach międzyostrogowych.
- Lokalnie, w rejonie główek ostróg, dochodzi dodatkowo do silnej erozji (wymycia w rejonie główek ostróg, Ilustracja 19).
- Dopiero podczas wysokich stanów wody, gdy główki są w całości zalane przez wodę, część osadzonych tam osadów zostaje ponownie uwolniona. Jednakże ogólna tendencja do zalądowania się przestrzeni międzyostrogowych pozostaje niezmienną.



Ilustracja 19: Rozkład prądów i morfologia rejonów ostróg (średnie stany wody)

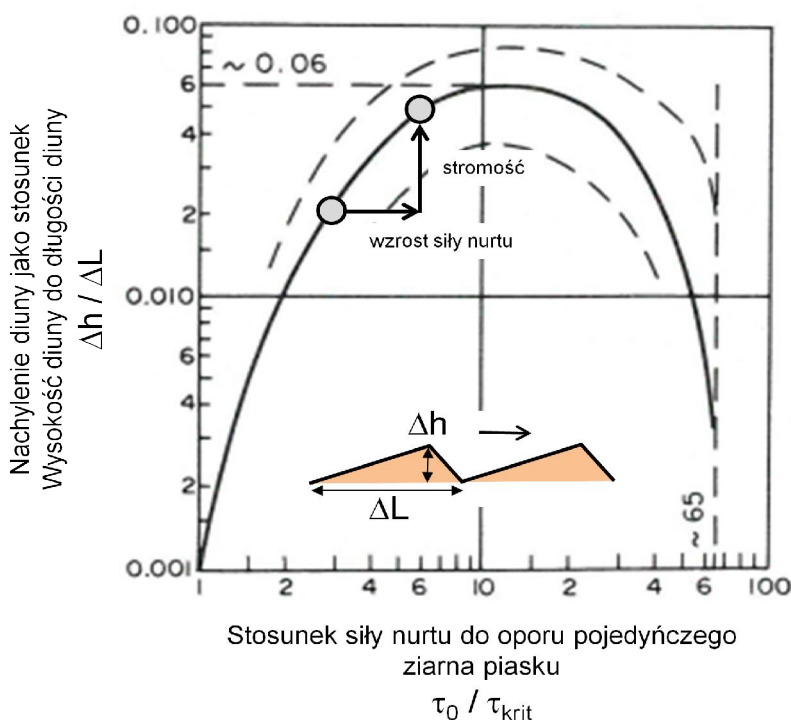
Zjawisko rozdzielania przepływu nurtu przy główkach sprawia, że ostrogi są budowlą wodną zwiększającą opór przepływu. Wysokie wartości gradientów szybkości przy główkach ostróg powodują, że laminarny przepływ niektórych warstw nurtu przechodzi w przepływ turbulentny, który wytwarza wiry. Wiry tworzą się i zanikają, a nurt wytraca energię kinetyczną, która na skutek tarcia zamienia się w ciepło. W rejonie przepływu turbulentnego z wieloma wirami dno ulega zwiększonej erozji – widać to na przykładzie typowego przegłębienia dna przy główkach ostróg (Ilustracja 19).



### 4.3.1 Oddziaływanie wzajemne ostróg i formy dennych

Ostrogi zmieniają rozkład prędkości i charakterystykę turbulencji w przekroju przepływu. Oba te aspekty oddziałują zasadniczo erozyjnie na dno. Gdy dno cieku jest piaszczyste, jak to ma miejsce w przypadku Odry, trzeba brać pod uwagę, że ciało transportowe, a zwłaszcza diuny i ławice piasku, reagują dynamicznym przystosowywaniem się do zmian nurtu.

Jak dotąd nie ma jeszcze założeń do obliczeń formy i rozmiarów trójwymiarowych diun. Odnośnie mniej skomplikowanych diun dwuwymiarowych stwierdzona została natomiast zależność między siłą nurtu a wysokością diuny (Raudkivi, 1976, por. Ilustracja 20). Nie można wykluczyć, że trójwymiarowe diuny reagują podobnie, a przynajmniej wykazują tendencje zbliżone.



W zakresie  $\tau_0/\tau_{krit} < 10$  nachylenie  $\Delta h / \Delta L$  zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia przepływu  $\tau_0$  do maksimum  $\Delta h / \Delta L \sim 0,06$ , a wydmy stają się bardziej strome, a tym samym wyższe.

W przypadku  $\tau_0/\tau_{krit} > 10$ , coraz więcej piasku transportuje się w zawieszinie, a wydmy stają się bardziej płaskie, aż w końcu całkowicie znikają ( $\tau_0/\tau_{krit} > 65$ )

Ilustracja 20: Zależność między stromością diun a wartością naprężenia ścinającego odnośnie diun dwuwymiarowych (zmod. z Raudkivi, 1976)

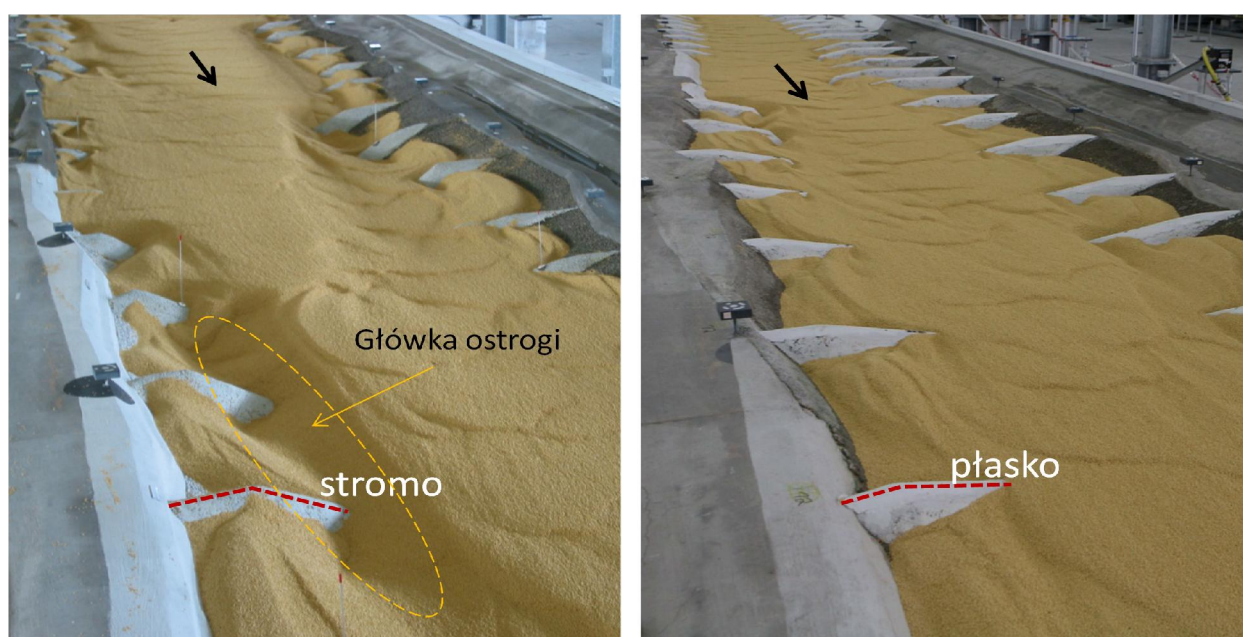
Tabela 3 zestawia dane sedymentologiczne i hydrauliczne odnośnie stanu zastanego z diagramem. Okazuje się, że przy przepływie wody średniej nadwyżka naprężenia ścinającego  $\tau_0/\tau_{krit}$  w całej Odrze granicznej leży dużo poniżej wartości 10. Przykładowo dla Odry na wysokości 618 km możliwe jest założenie, że podczas wezbrania powodziowego głębokość wody wynosi 5,5 m, co przy niezmienionym spadku prowadzi jedynie do nieznacznego podwyższenia nadwyżki naprężenia ścinającego do  $\tau_0/\tau_{krit} = 4,6$ . Tak więc także przepływy powodziowe nie skutkują osiągnięciem w Odrze wartości 10. W całym spektrum przepływów Odry wartości odnośnie dna plasują się w lewej części wykresu na Ilustracja 20, w której wzrost naprężeń ścinających prowadzi do tego, że diuny stają się coraz wyższe i coraz bardziej strome.

Tabela 3: Wartość napięć ścinających w ważnych punktach Odry

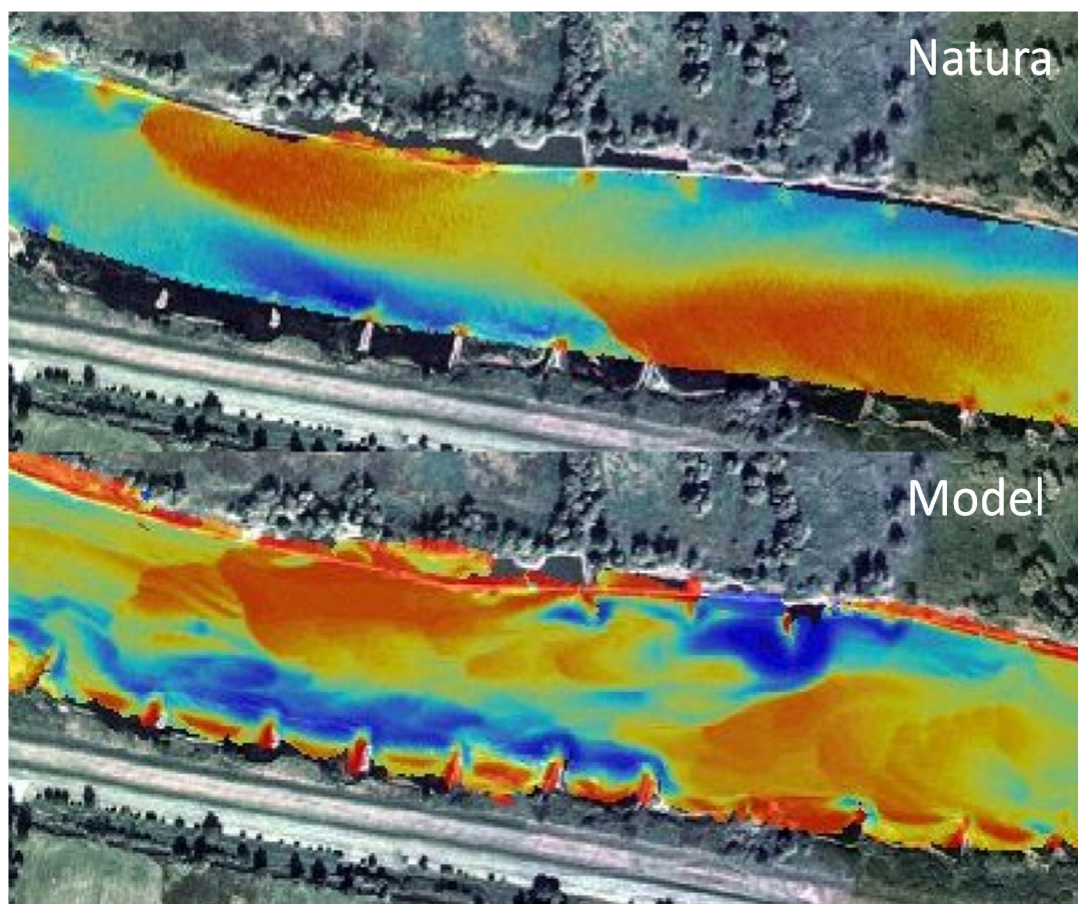
Oder-km	Frakcja $d_{50}$ (mm) KRC (Ilus. 3-4)	Prędkość poruszania wg Shields $\tau_{krit}$ (N/m <sup>2</sup> )	Głębokość wody $h$ (m) przy SWP (KRC Ilus. 6-10)	Spadek $I_0$ (-) Przy SWP (KRC Ilus. 3-5)	Obliczona siła nurtu $\tau_0$ (N/m <sup>2</sup> )	Nadwyżka napięcia ścinającego $\tau_0 / \tau_{krit}$ (-)
542	1,0	1,0	2,8	2,8E-04	2,8	<b>2,9</b>
617	0,7	0,7	2,9	2,4E-04	2,6	<b>3,8</b>
618	0,8	0,8	3,3	2,4E-04	2,8	<b>3,6</b>
700	0,5	0,5	3,7	4,2E-05	1,2	<b>2,5</b>

Wraz z rozbudową ostróg – zgodnie z danymi KRC – wzrasta siła nurtu i naprężenia ścinające dna. Diuny dwuwymiarowe w Odrze granicznej stałyby się wobec tego w całym spektrum przepływów wyższe i bardziej strome. Oddziaływanie to przyniosłoby efekt odwrotny do zamierzonego, jakim miało być pogłębienie dna poprzez rozbudowę ostróg.

Ponadto wykazano, jak dużą rolę odnośnie rozwoju dna i struktury diun spełniają turbulencje warstw wodnych w pobliżu główek ostróg. Bardziej płaskie nachylenie główek ostróg zakłóca tworzenie się warstw ścinających. Prowadzi to do tego, że przegłębienia dna w rejonie główek są mniejsze (Ilustracja 21 z /1/, s. 125). Jednakże trzeba tu nadmienić, że bardzo trudno jest w modelach fizycznych dokładnie odtworzyć parametry warunków naturalnych. Wyraźnie obrazuje to Ilustracja 22, gdzie zgodność z ogólnym zarysem form jest duża, natomiast duże różnice pojawiają się w odwzorowaniu szczegółów struktur i przegłębienia dna w rejonach główek. Także i w tym przypadku dużą rolę odgrywają turbulencje, które z powodu skali modelu i zasad, jakie przy tworzeniu modelu fizycznego należy zachować, nie dają się odwzorować tak, aby odpowiadały turbulencjom powstającym faktycznie w naturze (Sukhodolov et al., 2006).



Ilustracja 21: Zmniejszenie przegłębienia w rejonie główki ostrogi poprzez jej spłaszczenie w modelu fizycznym Odry (BAW) (zmod. z /1/, s. 125)



Ilustracja 22: Konfiguracja form dennych w naturze i w modelu fizycznym (zmod. z /1/, s. 74)

#### 4.3.2 Ostrogi jako miejsca bytowania organizmów żywych

Jest kwestią znaną, że pola międzyostrogowe są ważnymi siedliskami zastępczymi, czyli obszarami o dużej bioróżnorodności (Kleinwächter et al., 2017). Jednakże także siedliska wodne, które wytwarza nurt i turbulencje w rejonie główek ostróg, są ważne dla wielu gatunków.

Przegłębienia w rejonie główek ostróg cechuje duża stabilność także wtedy, gdy formy denne się przemieszczają lub transformują. Zwiększona energia kinetyczna turbulencji zapobiega odkładaniu się w przegłębieniach osadów i tworzenia się tu lodu dennego. Z tego powodu rejonny główek stanowią ważne miejsca zimowania dla ryb (Rakowitz et al., 2013). Spłaszczenie nachylenia główek ostróg zmniejszy głębokości w tych rejonach lub w ogóle je zniweluje (por. Ilustracja 21). Oznaczać to będzie więc również utratę siedlisk zastępczych.

## 5 Koncepcja ochrony przeciwpowodziowej Międzyodrza

Przygotowany przez stronę polską Projekt ochrony przeciwpowodziowej w dorzeczu Odry i Wisły/ Odra-Vistula Flood Management Project (POPDOW), finansowany m.in. ze środków Banku Światowego, zakłada przekształcenie Międzyodrza na obszarze od Widuchowej do mniej więcej Szczecina w sterowany polder zalewowy w celu poprawy ochrony przeciwpowodziowej. Aby tego dokonać, konieczne byłoby obwałowanie terenu Międzyodrza ciągiem 60 km wałów przeciwpowodziowych oraz wyposażenie polderu w urządzenia wlotowe i upustowe (zamknięcia i przelewy).

Międzyodrze rozciąga się między Odrą Zachodnią i Odrą Wschodnią, przy czym 60% powierzchni obszaru położona jest na rzędnych od 0,3 do 0,5 m n.p.m. (Buchholz, 2007). Oznacza to, że Międzyodrze jest częścią dynamicznej terasy zalewowej rzeki Odry. Obszar ten Odra zalewa regularnie, służy on więc on naturalnej retencji wody, a tym samym przyczynia się do ochrony przeciwpowodziowej. Zasiób żyjących tu gatunków i względnie występujące tu biotopy, świadczą o tym, że Międzyodrze pełni ważną funkcję ekologiczną, co było podstawą do objęcia tego obszaru ochroną i włączenia go do sieci obszarów Natura 2000.

Wraz z przeprowadzonymi na początku XX. wieku pracami regulacyjnymi na Odrze Zachodniej i Wschodniej nastąpiło przekształcenie Międzyodrza w polder na potrzeby gospodarki rolnej. Celem była wyłącznie ochrona łąk łągowych, które po regulacji w 1878 roku coraz częściej zalewane były przez powodzie letnie wywołane wzrostem średnich stanów letnich. Wylewy zimowe i wiosenne były w dalszym ciągu pożądane, gdyż nanosiły one na łąki żyzne osady (Kieseritzky, 1938).

W konsekwencji do roku 1930 wybudowano na Międzyodrzu obwałowania, kanały melioracyjne, przepompownie i śluzy. Ten historyczny zakres rozbudowy polderu posłużył także za podstawę obecnie planowanej rozbudowy ujętej w projekcie do Banku Światowego. Jednakże większość infrastruktury zniszczyły działania wojenne II wojny światowej, co spowodowało że w latach powojennych zaniechano rolniczego wykorzystania tworzących polder terenów. Obecnie Międzyodrze cechuje potencjalnie naturalna dynamika obszaru zalewowego.

### 5.1 Ogólnie o polderach zalewowych

#### 5.1.1 Pojęcia i definicje

Zastosowane poniżej pojęcia dotyczące polderów zgodne są z definicjami DWA (Tabela 4). „Poldery” to obwałowane w celu ochrony przeciwpowodziowej obniżenia terenu, przy czym „poldery suche” w miarę możliwości nie powinny być zalewane, natomiast na „polderach mokrych” ma być czasowo retencjonowana woda, np. do nawadniania pól. W przypadku gdy głównym zadaniem polderów jest ochrona przeciwpowodziowa, określa się je jako poldery zalewowe (niem. „Flutungspolder”) według DIN 19712 wg DWA, 2014).

Pod używanym w tekście pojęciem „wały ograniczające” („Trenndeiche”) rozumie się obwałowania odgraniczające polder zalewowy od rzeki. Ze względu na swoją hydrauliczną funkcję stare (historyczne) obwałowania Międzyodrza na wezbrania letnie należy także uznać za wały ograniczające. Wbudowane w obwałowania urządzenia wlotowe i upustowe, jak np. przelewy czy zamknięcia, umożliwiają napełnienie wodą i jej późniejszy spływ.

### 5.1.2 Mechanizm działania polderów zalewowych

Rola polderów zalewowych polega na tym, aby poprzez wylanie się wody na powierzchnię polderu doprowadzić do redukcji objętości przepływu wezbraniowego wód wielkich i spłaszczenia fali wezbraniowej. Rozróżnia się mechanizmy regulowane (sterowane) i nieregulowane (niesterowane) (Tabela 5).

Tabela 4 Poldery – pojęcia i definicje (wg DWA 2014)

<b>Polder</b> (tu zdefiniowany jako obszar, który ma być chroniony przed powodzią)	Obszar chroniony przed zalaniem poprzez przebiegające liniowo budowle ochrony przeciwpowodziowej (np. obwałowania, mury, elementy ruchome); odnośnie sposobu opróżniania polderu rozróżnia się poldery otwarte (odpływ wody odbywa się w sposób swobodny) i poldery zamknięte (odpływ wody odbywa się w sposób wymuszony np. przy użyciu przepompowni).
<b>Polder zalewowy</b> (tu zdefiniowany jako przestrzeń służąca celom ochrony przeciwpowodziowej)	Przestrzeń, którą woda nie przepływa, a która służy do okresowej retencji określonej objętości przepływu powodziowego, gdzie napływ wody odbywa się od określonej wartości miarodajnego przepływu powodziowego lub od określonych stanów wody w sposób niesterowany (przepływ) lub sterowany (wlot) i gdzie woda jest spiętrzana do wartości nieznacznie przewyższających rzędne położenia zwierciadła wody w korycie głównym cieku i który po przejściu fali kulminacyjnej wezbrania opróżniany jest w sposób kontrolowany (upust).
<b>Polder przepływowy</b> (tu zdefiniowany jako przestrzeń służąca celom ochrony przeciwpowodziowej)	Przestrzeń, którą woda przepływa i która służy do odprowadzenia określonej wartości miarodajnego przepływu powodziowego, gdzie napływ wody odbywa się od określonej wartości takiego przepływu lub od określonych stanów wody w sposób niesterowany (przepływ) lub sterowany (wlot). Uwaga: Polder przepływowy z definicji różni się więc od kanałów ulgi (przy tworzeniu których buduje się również przebiegające liniowo obwałowania) oraz od cofnięcia wałów (gdzie uwolniona przestrzeń jest przez miarodajny przepływ powodziowy wykorzystywana).

Tabela 5 Mechanizmy działania polderów zalewowych (wg DWA 2014)

Mechanizm	Miejsce	Okres działania
„regulowany”	nieustalone	nieokreślony
„warunkowo regulowany”	nieustalone	zależnie od stanów wody
„regulowany”	ustalone	zależnie od stanów wody
„sterowany”	ustalone	sterowany

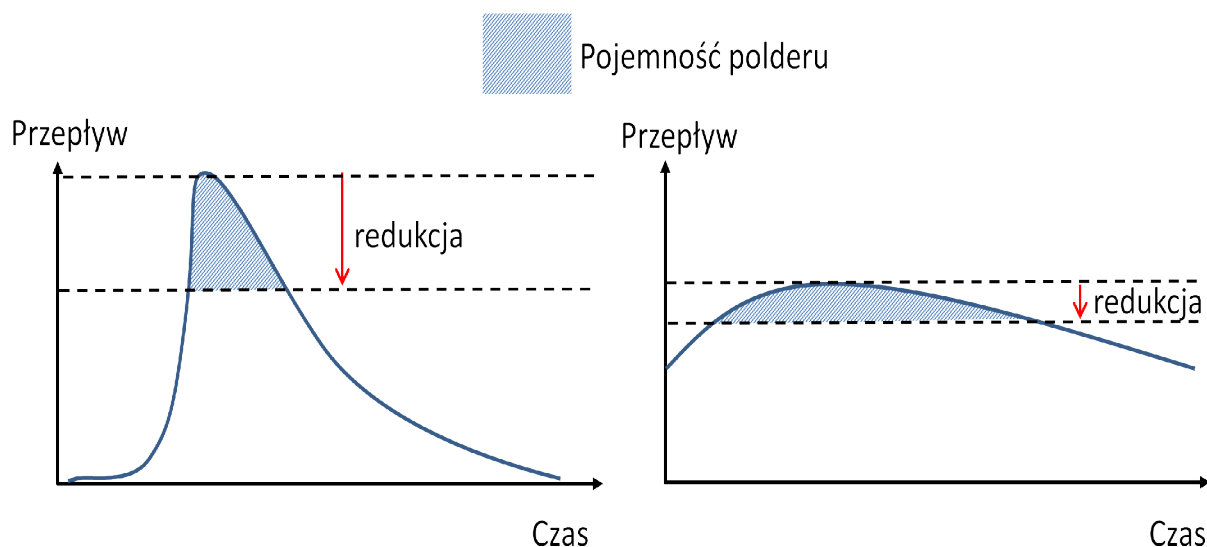
Najbardziej skutecznym w ochronie przeciwpowodziowej jest sterowany polder zalewowy, w którym miejsce wlotu jest ściśle określone przez odpowiednią konstrukcję obwałowania, a budowle wpustowe i upustowe pozwalają regulować moment i czas trwania napełniania polderu wodą. Dzięki temu oddziaływanie na kształt fali powodziowej może być dostosowane do przebiegu zjawiska powodziowego. Niesterowane poldery przepływowe pozwalają na taką kontrolę w stopniu najmniejszym. Taki scenariusz rozgrywa się przy przerwaniu wałów, na które nie można oddziaływać ani w czasie ani w przestrzeni.

W Tabeli 6 zestawiono hydrotechniczne budowle i urządzenia konieczne przy poszczególnych mechanizmach działania polderów. Wynika z niej, że sterowany polder zalewowy musi posiadać sterowalne urządzenia wpustowe wyposażone np. w zasuwę.

Tabela 6 Budowle hydrotechniczne (wg DWA 2014)

Budowle hydrotechniczne jak np.:	Działanie polderu
Wał ze szczelnym rdzeniem (systemy odporne na erozję)	„warunkowo regulowany”
Przelew powierzchniowy (bez urządzeń regulujących)	„regulowany”
Urządzenie wlotowe z zasuwą (z urządzeniami regulującymi)	„sterowany”

Zastosowanie polderów zalewowych przynosi największe efekty wówczas, gdy fala wezbraniowa jest wysoka i szybko koncentrująca się, a pojemność polderu w stosunku do objętości przepływu jest duża. Taka sytuacja ma miejsce zwłaszcza w górnym i środkowym biegu cieków. W przypadku niższych i rozciągniętych w czasie fal wezbraniowych, tak jak to ma miejsce w dolnym biegu rzek, poldery zalewowe przynoszą mniejsze efekty. Aby poldery te mogły przez dłuższy okres czasu przyjmować napływającą wodę, ich pojemność musi być w odniesieniu do wielkości przepływu bardzo duża (Ilustracja 23).



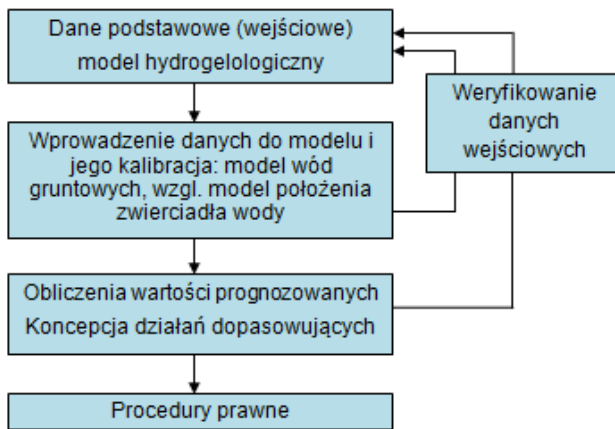
Ilustracja 23: Redukcja fali wezbraniowej wysokiej o krótkim czasie koncentracji i fali niższej i rozciągniętej w czasie przy takiej samej pojemności retencyjnej polderu

### 5.1.3 Obliczanie pojemności polderów zalewowych

Pojemność polderów zalewowych wynika ze przebiegu stanów wody. Należy przy tym uwzględnić stany wody w przekroju wlotu oraz rzędne korony wałów ograniczających i przelewów, a także fakt, czy woda ma przez polder przepływać czy być w nim retencjonowana.

Duża liczba możliwych do zastosowanie form regulacji oraz zróżnicowanie hydrologicznych warunków wyjściowych zmusza do zastosowania modeli numerycznych. Do tego celu wykorzystuje się z reguły dwuwymiarowe modele przepływu nurtu w ruchu nieustalonym (modele 2D).

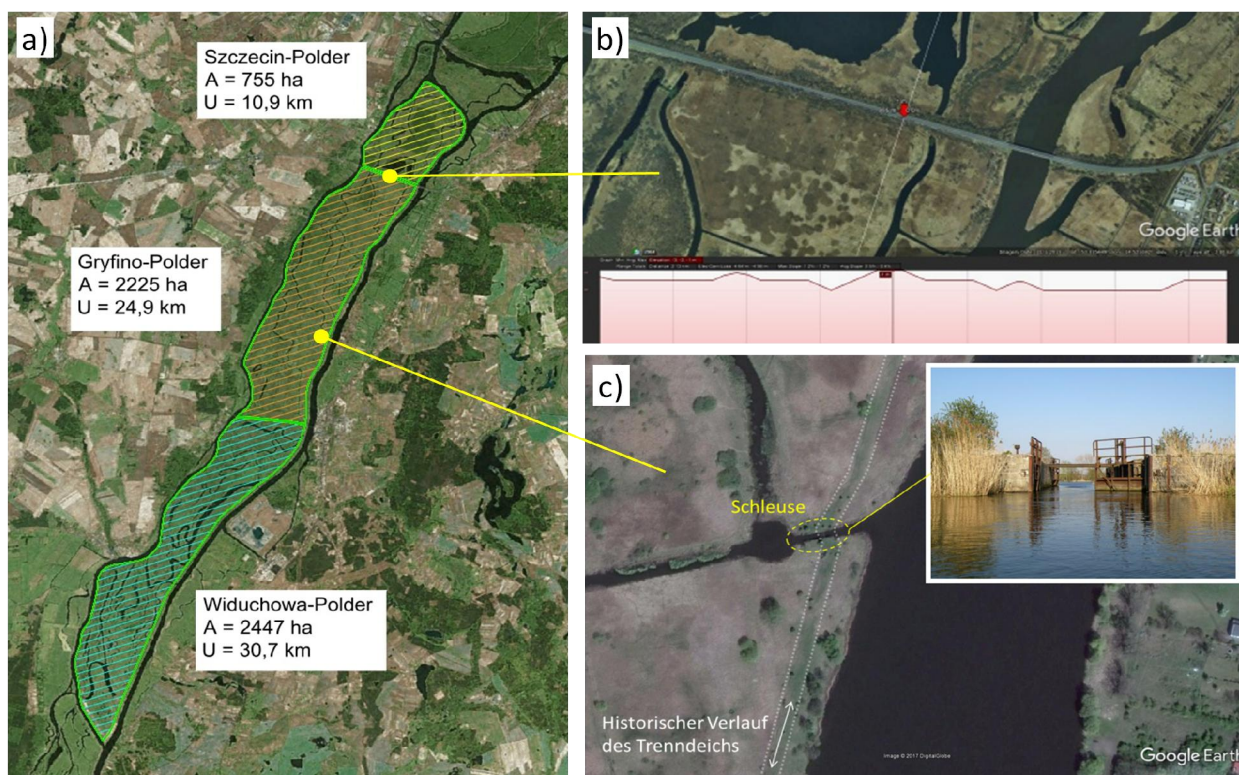
Ilustracja 24 przedstawia typowy przebieg projektowania polderu. Dopiero obliczenia położenia zwierciadła wody w połączeniu z danymi geometrii terenu pozwala na dokładne obliczenie pojemności polderu.



Ilustracja 24: Schemat postępowania przy pracach planistycznych budowy polderu (wg DWA 2014)

## 5.2 Powierzchnia i pojemność polderu Międzyodrze

Na całkowitą powierzchnię Międzyodrza składają się trzy części, które rozdzielają usytuowana na obwałowaniu autostrada A6 (= A11 po niemieckiej części, dalej na zachód) oraz połączenie drogowe Mescherin-Gryfino (B 133 / DW 120) - (Ilustracja 25). Powierzchniowo największy jest położony na południu polder „Widuchowa“, nieco mniejszy jest położony w środku polder „Gryfino“, a mniejszy o jedną trzecią jest położony na północy polder „Szczecin“, którego rzędna jest stosunkowo niska. Nasyp autostrady unosi się nad poziomem terenu i z hydraulicznego punktu widzenia jest położonym pomiędzy polderami wałem ograniczającym. Natomiast połączenie drogowe Mescherin-Gryfino nie posiada obwałowania i tym samym nie dzieli polderów pod względem hydraulicznym.



Ilustracja 25: (a) położenie, powierzchnia (A) i wielobok ją opisujący (U) oraz części polderu, (b) położenie nasypu autostrady oddzielającego poldery Szczecin i Gryfino, (c) zdjęcia lotnicze, na których rozpoznawalny jest przebieg historycznych obwałowań (przykładowo na 53.287424°, 14.491020°) oraz fotografie infrastruktury technicznej (źródło: google earth)

Podane dane określające powierzchnie polderów odnoszą się do obszarów, które z hydraulicznego punktu widzenia faktycznie spełniają funkcję retencyjną. Za granicę poszczególnych polderów przyjęto historyczne obwałowania, których linię widać wyraźnie na zdjęciach lotniczych (Ilustracja 25). Za dodatkowe punkty orientacyjne posłużyły jeszcze istniejące stare przepusty i śluzy.

Powierzchnia każdego z polderów jest określana w zależności od podanych źródeł oraz definicji ich granicy (brzeg, strefa brzegowa, główny nurt rzeki, itd.), podawane w źródłach wartości nie są jednak jednakowe. Obliczona dla niniejszej opinii powierzchnia pokrywa się z danymi Atlasu Odry oraz WWF-Niemcy i Instytutu Łęgów WWF (Tabela 7).



Tabela 7: Powierzchnie polderów na podstawie literatury ([http://atlas.odra.pl/tab\\_3.html](http://atlas.odra.pl/tab_3.html)) i obliczeń własnych

	Dokumenty urzędowe	Atlas Odry WWF	Obliczenia własne gIR 2017
Szczecin-Polder	790 ha	758 ha	755 ha
Gryfino-Polder	2.360 ha	2.280 ha	2.225 ha
Widuchowa-Polder	2.540 ha	2.450 ha	2.447 ha
<b>Międzyodrze gesamt</b>	<b>5.690 ha</b>	<b>5.488 ha</b>	<b>5.427 ha</b>

W dokumencie „Project Appraisal Document“ (PAD /2/), będącym częścią projektu finansowanego przez Bank Światowy, powierzchnia retencyjna całego polderu Międzyodrza przy poziomie hipotetycznego zwierciadła wody rzędu 1,0 m opisana została wartością 1,0 mld m<sup>3</sup> („A one meter high water layer on the wetland would store about 1 billion m<sup>3</sup> of floodwater“, S.38/ *Jednometrowa warstwa wody na powierzchni retencyjnej pomieści około 1 miliarda m<sup>3</sup> wody powodziowej*). Ta wartość **jest błędna** i przy powierzchni polderu 54,27 km<sup>2</sup> oraz średniej głębokości zretencjonowanej wody wynoszącej 1,0 m musi ona zostać zweryfikowana do wartości 54,27 mln m<sup>3</sup> (5,427 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>). **Oznacza to, że podana w dokumencie PAD objętość retencyjna polderu przy 1,0 m głębokości zretencjonowanej w polderze wody odpowiada jedynie 5,4% podanej w dokumencie PAD wartości.**

Jak to wyjaśniono w rozdziale 5.1.3, dokładne wyliczenie pojemności polderu zalewowego możliwe jest jedynie w oparciu o numeryczny model hydrauliczny i obliczenia położenia zwierciadła wody. Aby to było możliwe, znane musiałyby być rzędne korony wałów ograniczających oraz położenie budowli wlotowych i upustowych wraz ze stanami wody na ich przekroju.

Atlas obszarów zalewowych WWF (2012) podaje objętości polderów (Tabela 8). Nie podaje jednak informacji o tym, jak te wartości obliczono.

Tabela 8: Pojemność polderu na podstawie literatury [http://atlas.odra.pl/tab\\_3.html](http://atlas.odra.pl/tab_3.html)

	Pojemność polderu Atlas Odry WWF	Średnia głębokość wody retencjonowanej w polderze
Szczecin-Polder	2,7 mln m <sup>3</sup>	0,36 m
Gryfino-Polder	10 mln m <sup>3</sup>	0,44 m
Widuchowa-Polder	19 mln m <sup>3</sup>	0,77 m
<b>Międzyodrze łącznie</b>	<b>31,7 mln m<sup>3</sup></b>	<b>0,58 m</b>

Obliczone wartości uśrednionych głębokości zretencjonowanej w polderze wody ukazuje Tabela 8, otrzymano je w wyniku podzielenia objętości poszczególnego polderu przez powierzchnię podaną w Tabeli 7.

### 5.3 Obliczenia szacunkowe cofki wiatrowej na jeziorze Dąbie

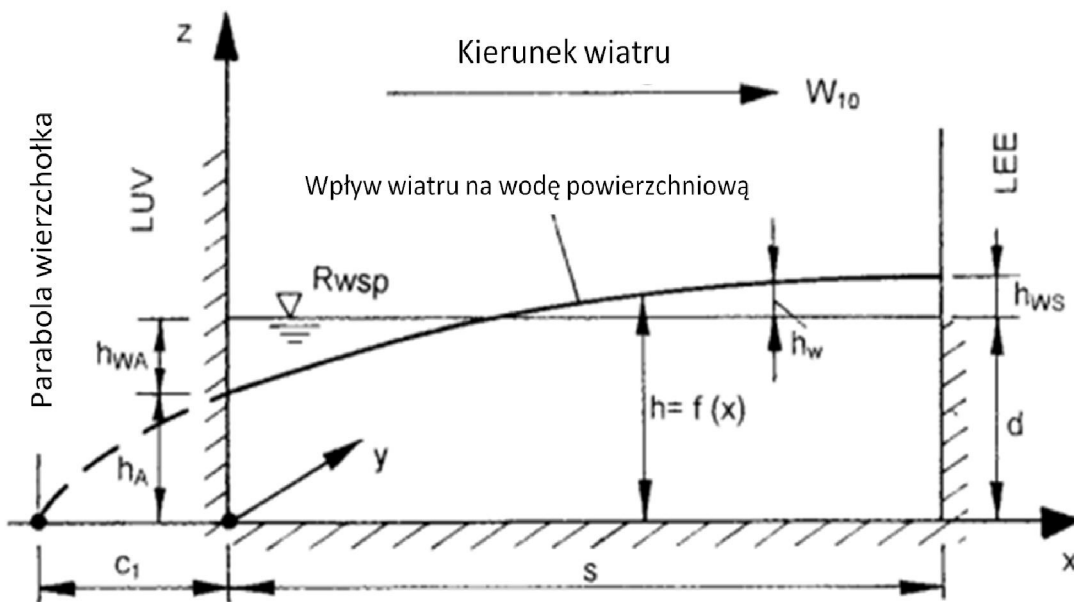
W kontekście ochrony przeciwpowodziowej Szczecina ciągle podkreślane jest niebezpieczeństwo wywołanego wiatrem podpiętrzenia wody na jeziorze Dąbie (por. Ilustracja 13).

Podstawą do obliczeń spiętrzenia wiatrowego  $h_{ws}$  (m) jest metoda Wagnera (1969):

$$h_{ws} = \frac{\lambda_t}{g \cdot d} \cdot \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} \cdot (s - x_s)$$

gdzie

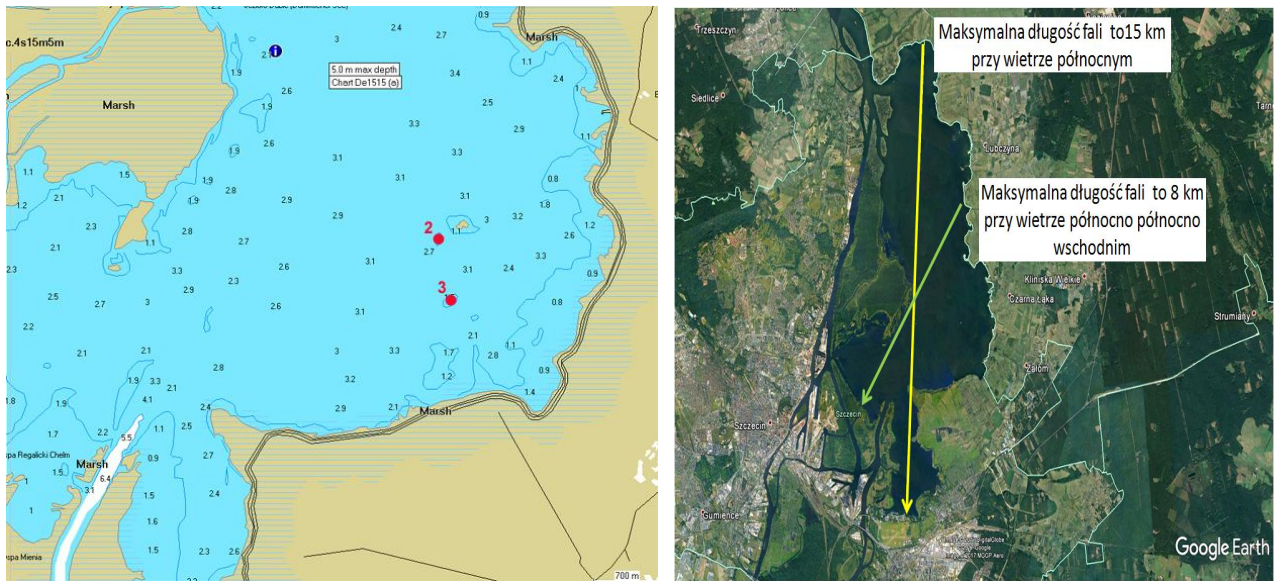
$\lambda_t$ (-)	funkcja stanu dynamicznego powierzchni wody
$\tau_{wi}$ (N/m <sup>2</sup> )	naprężenie wiatrowe
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	gęstość wody
$d$ (m)	średnia głębokość wody
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	przyspieszenie grawitacyjne
$s$ (m)	długość rozbiegu fal (fetch)
$x_s$ (m)	odległość punktu ciężkości jeziora od napowietrznego brzegu



Ilustracja 26: Schemat definicji obliczenia cofki wiatrowej (wg Wagner, 1969)

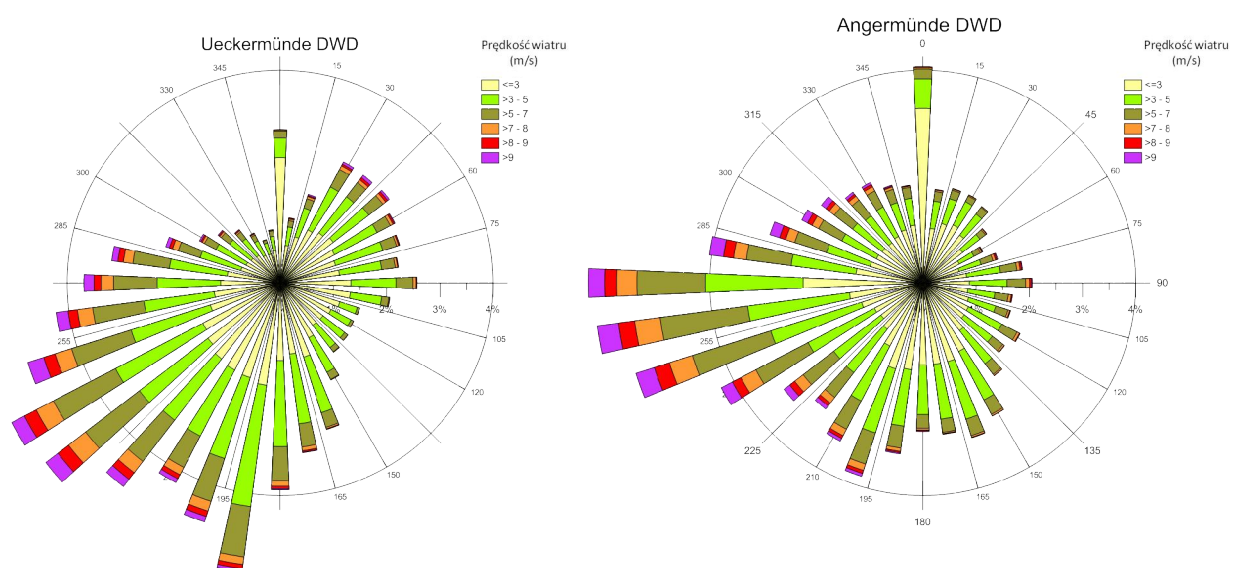
Dane konieczne do obliczeń cofki wiatrowej w rejonie Szczecina zestawiono w poniższych ilustracjach. Średnia głębokość jeziora Dąbie wynosi ok. 3,0 m (Ilustracja 27), a długość rozbiegu fal w odniesieniu do Szczecina wynosi 15 km.

W raporcie powodzi LUA (1998) /8/ podaje się, że samo oddziaływanie cofki wiatrowej na Zalewie Szczecińskim może podnieść stany wody od 30 do 70 cm. Jednakże tak duży przyrost nie może być wywołany jedynie przez cofkę wiatrową. Najprawdopodobniej wymieniona dla cofki wiatrowej w /8/ wartość oznacza sumaryczne oddziaływanie wszystkich czynników wywołanych wysokim stanem Bałtyku, przekładających się na sytuację na Zalewie Szczecińskim, jak to zostało przedstawione w rozdziale 3.4 (Ilustracja 10).



Ilustracja 27: Mapa obrazująca głębokości jeziora Dąbie (źródło: <http://jkazs.szn.pl/sites/default/files/wpt.jpg>) oraz maksymalny rozbieg fal na jeziorze Dąbie w odniesieniu do stanów wody w Szczecinie (źródło: google earth)

Dane dotyczące wiatru pochodzące z dwóch stacji Niemieckiej Służby Meteorologicznej w pobliskich Ueckermünde i Angermünde przedstawia Ilustracja 28 jako róże wiatrów. Wynika z nich, że odpowiedzialne za cofkę wiatrową wiatry z północy i północnego wschodu w rejonie Szczecina występują raczej rzadko (w schemacie przedstawione za pomocą długości sektorów), ale za to ich prędkość dochodzić może nawet do 9,0 m/s (w schemacie obrazuje to skala barw).



Ilustracja 28: Róże wiatrów stacji meteorologicznych DWD w Ueckermünde i Angermünde (źródło danych: /14/)

Z danych o wiatrach, funkcji stanu dynamicznego powierzchni wody wg Wagnera (1969) i naprężeń wiatrowych wynika, że spiętrzenie wiatrowe dla Szczecina to wartość rzędu 3 cm.

Cofki wiatrowej na jeziorze Dąbie nie można zatem uznać czynnikiem w stopniu znaczącym oddziałującym na przebieg zjawisk powodziowych w rejonie Szczecina.

#### 5.4 Rola i działanie polderu zalewowego Międzyodrza

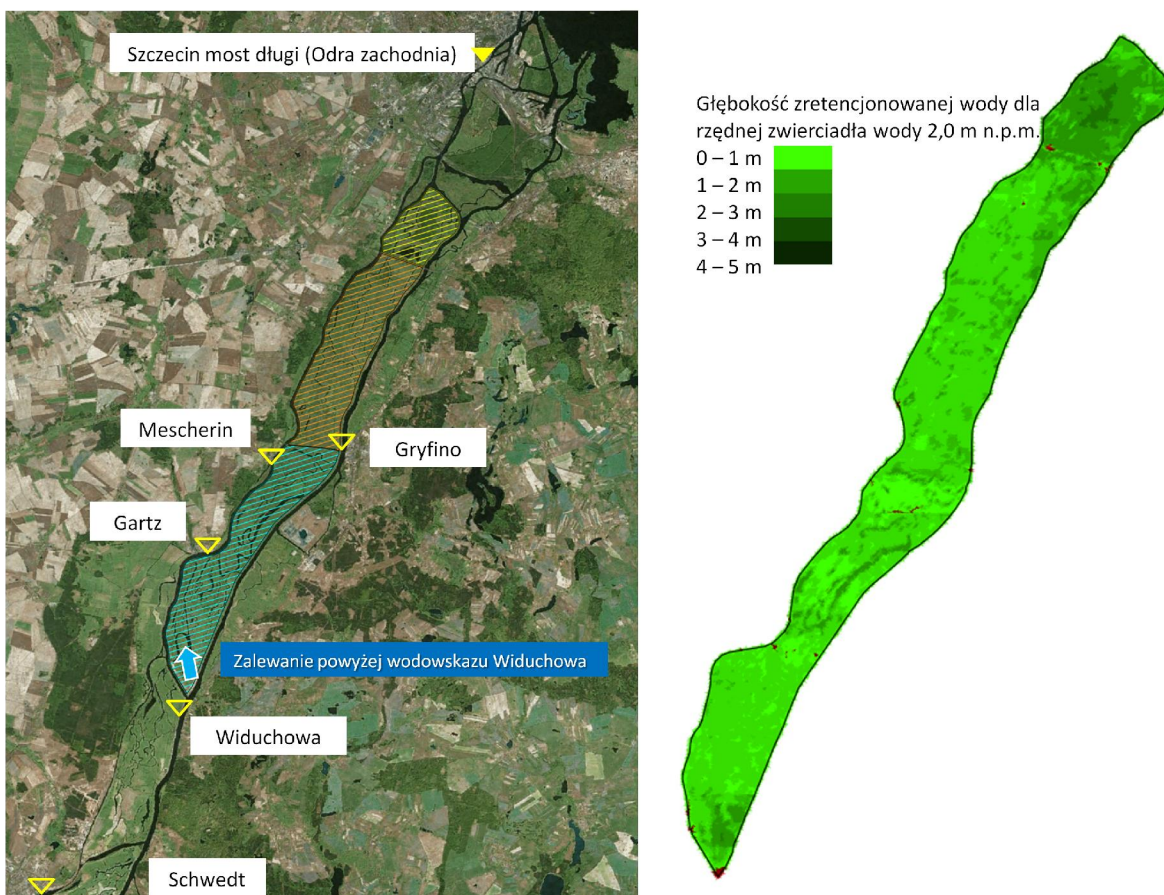
Jak to zostało przedstawione w rozdziałach dotyczących warunków hydrologicznych i zjawisk powodziowych na dolnej Odrze (3.2 i 3.3), Międzyodrza jest skomplikowanym systemem hydraulicznym. Dokładne zwymiarowanie i sterowanie poszczególnymi polderami przy różnym przepływie wymaga zatem zastosowania modelu 2D. Jednakże podstawowa funkcja i wynikające z niej zastosowanie sterowanego polderu Międzyodrza dadzą się sformułować także bez modelu numerycznego i streścić w następujących punktach:

- Omawiany polder stwarza niekorzystne warunki do redukcji fali wezbraniowej na Odrze, gdyż położony jest on w końcowym odcinku dolnego biegu rzeki a hydrogramy powodziowe pokazują, że dochodząca w ten rejon fala powodziowa jest już mocno spłaszczona (por. rozdział 3.3). Dlatego szczyt fali nie jest tu stromy i wyraźny, za to okres przepływu wezbraniowego i utrzymujących się wysokich stanów wód znacznie się wydłużona. Aby osiągnąć redukcję fali wezbraniowej, polder musiałby być zalewany przez odpowiednio długi czas, to znaczy kilka dni lub tygodni. Jednakże pojemność retencyjna polderu w odniesieniu do objętości przepływu powodziowego jest za mała, aby zatrzymać ilość wody efektywnie zmniejszającą kulminację wezbraniową. Z tego powodu już z samego założenia skuteczność polderu w redukowaniu fali powodziowej należy szacować nisko. Odnośne przykłady obliczeniowe podane są w rozdziale 5.5.
- Możliwość sterowania polderami zalewowymi na Międzyodrzu ma służyć ochronie przeciwpowodziowej miasta Szczecina. Jak to zostało przedstawione w rozdziale 3.3, stan wody w Szczecinie zależy od stanu wody na Zalewie Szczecińskim czyli od stanów morza. Gwałtowne przepływy przy niskich wartościach liczby Froude'a, jak to ma miejsce w przypadku dolnej Odry, mogą być regulowane od strony wody dolnej. Zatem aby skutecznie chronić Szczecin przed powodzią, konieczne byłoby usytuowanie polderu zalewowego poniżej Szczecina lub między jeziorem Dąbie a Zalewem Szczecińskim. Międzyodrza tego warunku nie spełnia.
- Ewentualna redukcja fali wezbraniowej powyżej Szczecina praktycznie nie ma wpływu na stany wody w Szczecinie. Buchholz (2007) wykazuje, że podczas powodzi katastrofalnej w 1997 z przepływami kulminacyjnymi powyżej 2.600 m<sup>3</sup>/s stany wody w Zalewie i Szczecinie podnosiły się jedynie nieznacznie (por.
- 
- Ilustracja 10). Tak samo znikome oddziaływanie na przyrosty stanów w Szczecinie miałyby retencja wody w polderze Międzyodrza.

- Z powodu małej głębokości, poniżej 5,0 m, tarcie wiatrowe na jeziorze Dąbie nie może wywołać dużego spiętrzenia wiatrowego. Dla rejonu Szczecina miarodajne są wiatry z kierunku północnego, a wywoływane przez nie cofki wiatrowe nie przekraczają wartości kilku centymetrów (por. rozdział 3.5.1).
- Już dzisiaj i to bez żadnych nakładów finansowych Międzyodrze spełnia w sposób naturalny funkcję polderu przepływowego (por. rozdział 5.1.1), przez który swobodnie przepływa woda powodziowa. Dzięki temu zwiększa się przekrój przepływu dolnej Odry, a stany wody obniżają się, co wpływa korzystnie na przebieg powodzi. Obwałowania i sterowane poldery zniweczyłyby ten pozytywny efekt, a poldery do momentu ich otwarcia nie zwiększałyby przekroju przepływu. Skutkowałoby to przyrostem stanów wody w rejonie usytuowania polderów zarówno przed jak i po ich zalaniu. .

## 5.5 Warianty obliczeniowe transformacji fali wezbraniowej

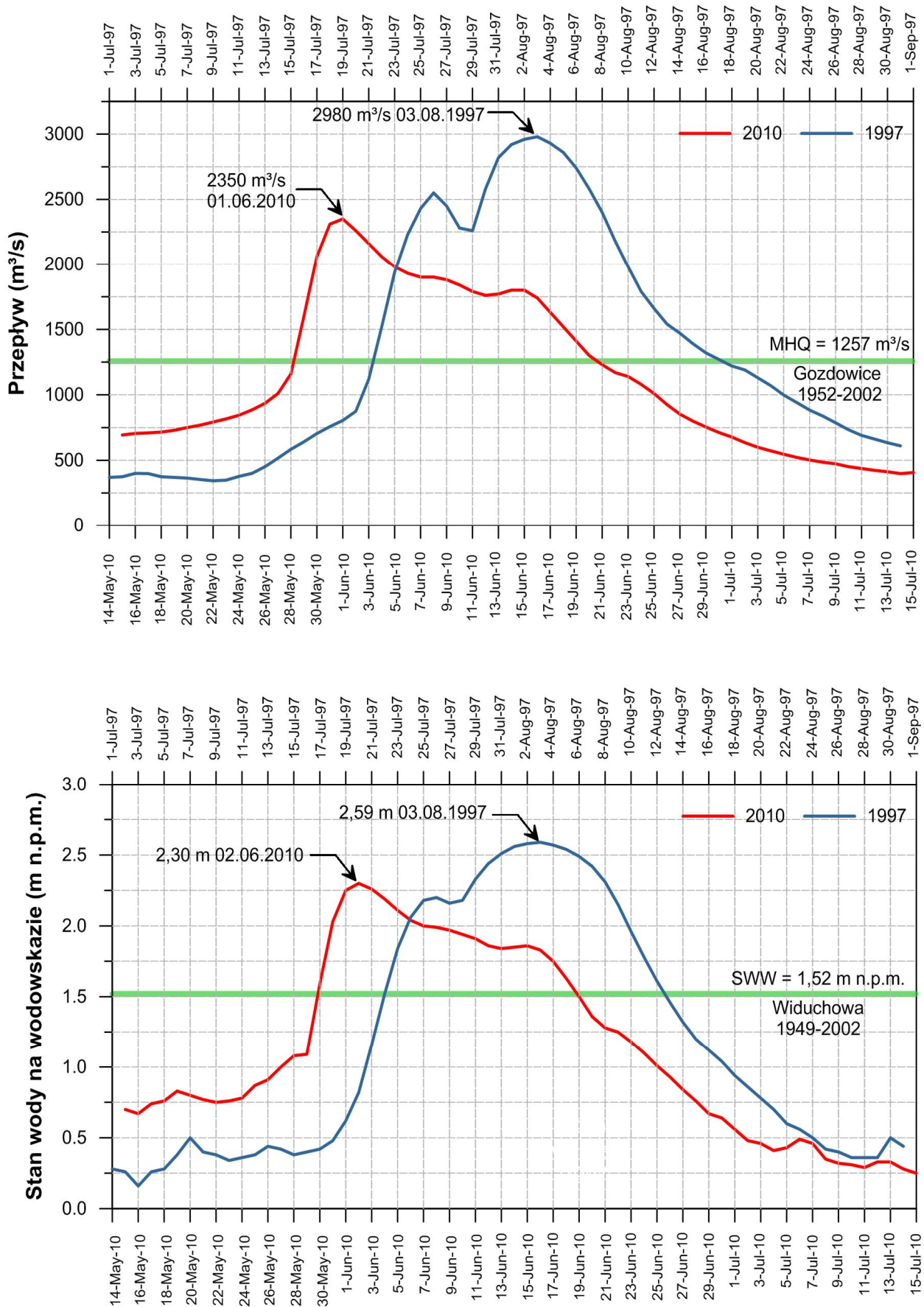
Poniższe obliczenia obrazują skuteczność polderu w transformowaniu fali wezbraniowej w odniesieniu do danych z powodzi w latach 1997 i 2010. Dla uproszczenia trzy poszczególne poldery zostaną zsumowane w jeden. Wlot do polderu Międzyodrza zasymulowano w węźle wodnym Widuchowa, a za wodowskaz miarodajny przyjęto w związku z tym wodowskaz Widuchowa (Ilustracja 29).



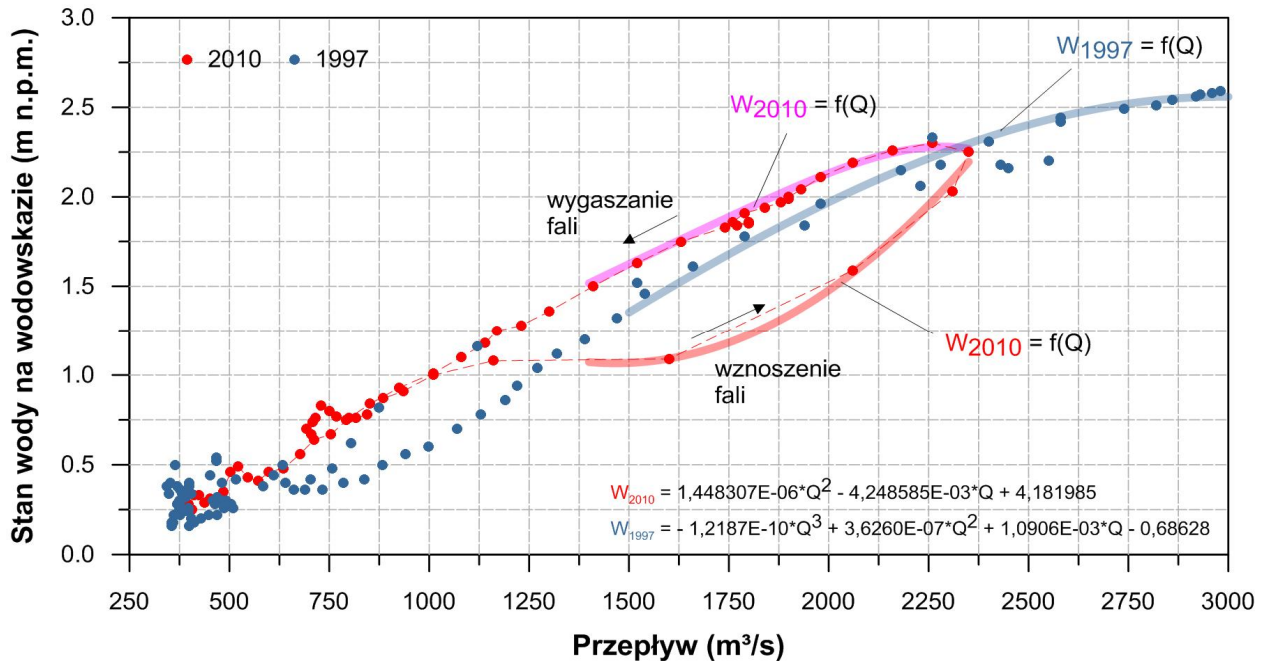
Ilustracja 29: Wodowskazy w przykładzie obliczeniowym z wlotem na węźle wodnym Widuchowa oraz obliczone na podstawie danych DGM /12/ głębokości zretencjonowanej wody dla rzędnej zwierciadła wody 2,0 m n.p.m.

Średni wysoki stan wody w przekroju wodowskazowym Widuchowa to SWW = 1,52 m n.p.m. Kulminacyjna objętość fali wezbrania w 2010 wynosiła 2.350 m<sup>3</sup>/s na rzędnej 2,30 m n.p.m., a w 1997 2.980 m<sup>3</sup>/s na rzędnej 2,59 m n.p.m. (Ilustracja 30, wartości odpowiednie do danych wg /9/, Tab. 2-1).

Dane posłużyły do zrekonstruowania krzywej konsumcyjnej (krzywej przepływu), która daje podstawę do obliczeń stanu wody po redukcji kulminacji uzyskanej przez wypełnienie polderu wodą wezbraniową (Ilustracja 31).



Ilustracja 30: Hydrogramy (przeptyw-stan) dla wezbrań w latach 1997 i 2010 na przekroju wodowskazowym Widuchowa (źródło danych: /11/)



Ilustracja 31: Zależność przepływ-stan w przepływach powodziowych z lat 1997 i 2010 w przekroju wodowskazowym Widuchowa. Powódź 2010 charakteryzuje się silną histerezą, której wartość dochodzi do 0,7 m różnicy w położeniu zwierciadła wody przy jednakowym natężeniu przepływu.

Nie istnieją jeszcze konkretne plany rozbudowy regulacyjnej Międzyodrza. Dlatego przyjęte obliczeniowe wartości objętości retencyjnej polderu są hipotetyczne.

Obok pojemności retencyjnej polderu podanej w Atlasie Odry WWF oraz zweryfikowanej pojemności podanej w dokumencie PAD (por. rozdział 5.2), za trzeci punkt odniesienia przyjęto średni stan wody wysokiej SWW = 1,5 m n.p.m. w przekroju wodowskazowym Widuchowa. W wariancie czwartym podniesiono średnią wielką wodę o dalsze 0,5 m, co odpowiada rzędnej 2,0 m n.p.m. w przekroju wodowskazowym Widuchowa.

W modelu CIVIL-3D dla wariantów SWW i SWW+0,5 m powierzchnia horyzontalna wody nałożona została na geometryczne dane (DGM /12/) Międzyodrza, a uzyskana różnica posłużyła za podstawę obliczenia pojemności polderu (por. Ilustracja 29). Tabela 9 zestawia wyniki wszystkich czterech wariantów obliczeniowych.

Tabela 9: Wartości przepływu i pojemności polderu przyjęte w poszczególnych wariantach obliczeniowych

Wariant obliczeniowy	Stan wody w polderze (m n.p.m.)	Objętość polderu (mln m <sup>3</sup> )	Średnia głębokość zretencjonowanej wody (m)
Atlas Odry	0,38	31,7	0,58
PAD /2/ skorygowane	0,8	54,3	1,0
Rozbudowa do SWW	1,5	92,2	1,7
Rozbudowa powyżej SWW	2,0	119,4	2,2



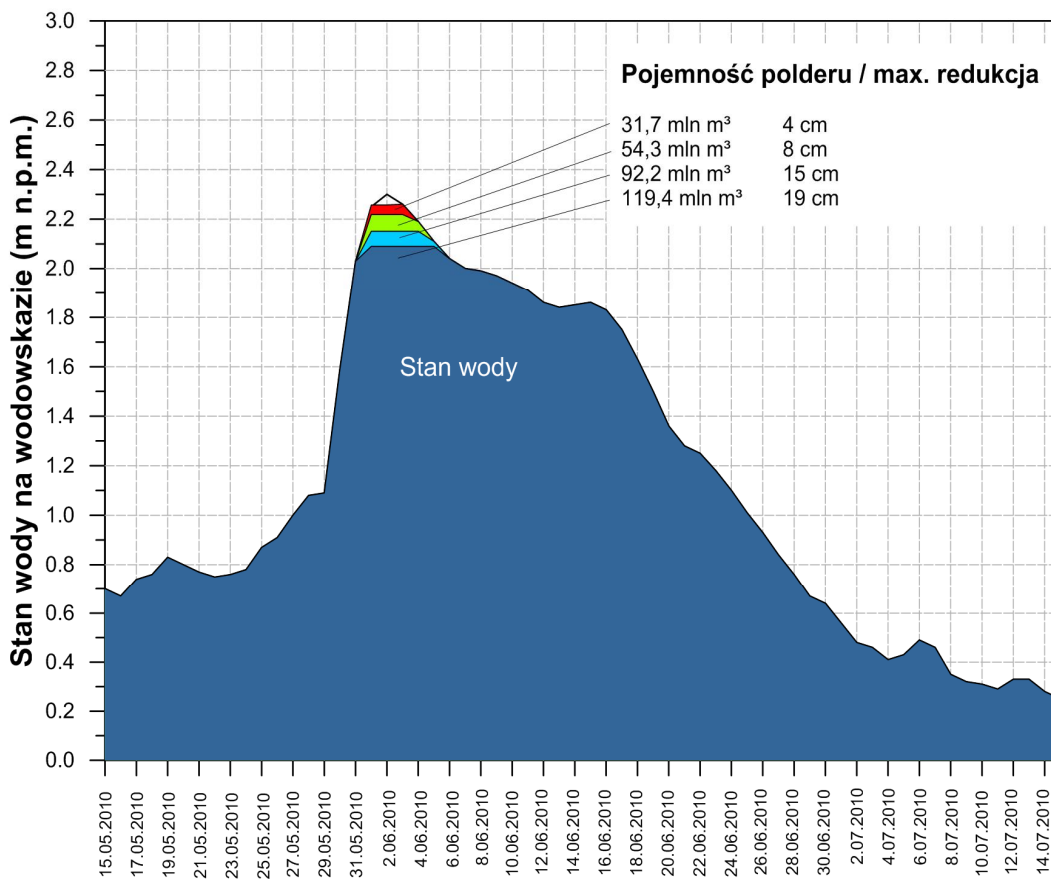
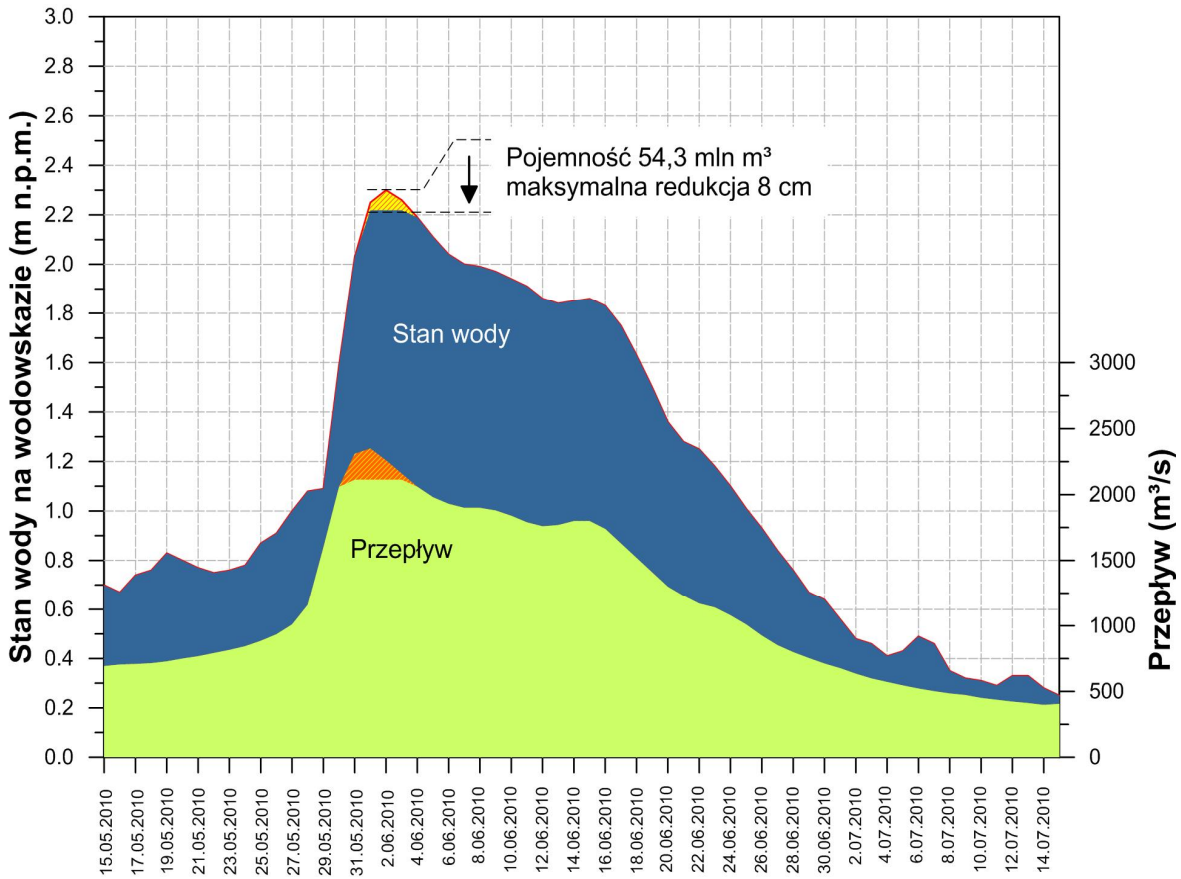
Hipotetycznych wartości położenia zwierciadła wody w polderze (SWW, SWW+0,5 m) nie należy utożsamiać z wysokością korony wałów ograniczających. Aby obwałowanie polderu mogło ochronić przed powodzią z 1997 konieczne byłoby podniesienie korony wałów co najmniej do rzędnej 2,6 m n.p.m. (bez uwzględnienia przestrzeni między krawędzią wału a lustrem wody (niem.: Freibord) i cofki wiatrowej).

Chociaż podana pojemność polderu wydaje się duża, to jednak w odniesieniu do objętości przepływów w Odrze jest stosunkowo mała. Dla przykładu wypełnienie polderu o pojemności retencyjnej rzędu 54,3 mln m<sup>3</sup> wodą w ilości 150 m<sup>3</sup>/s trwać będzie ok. cztery doby.

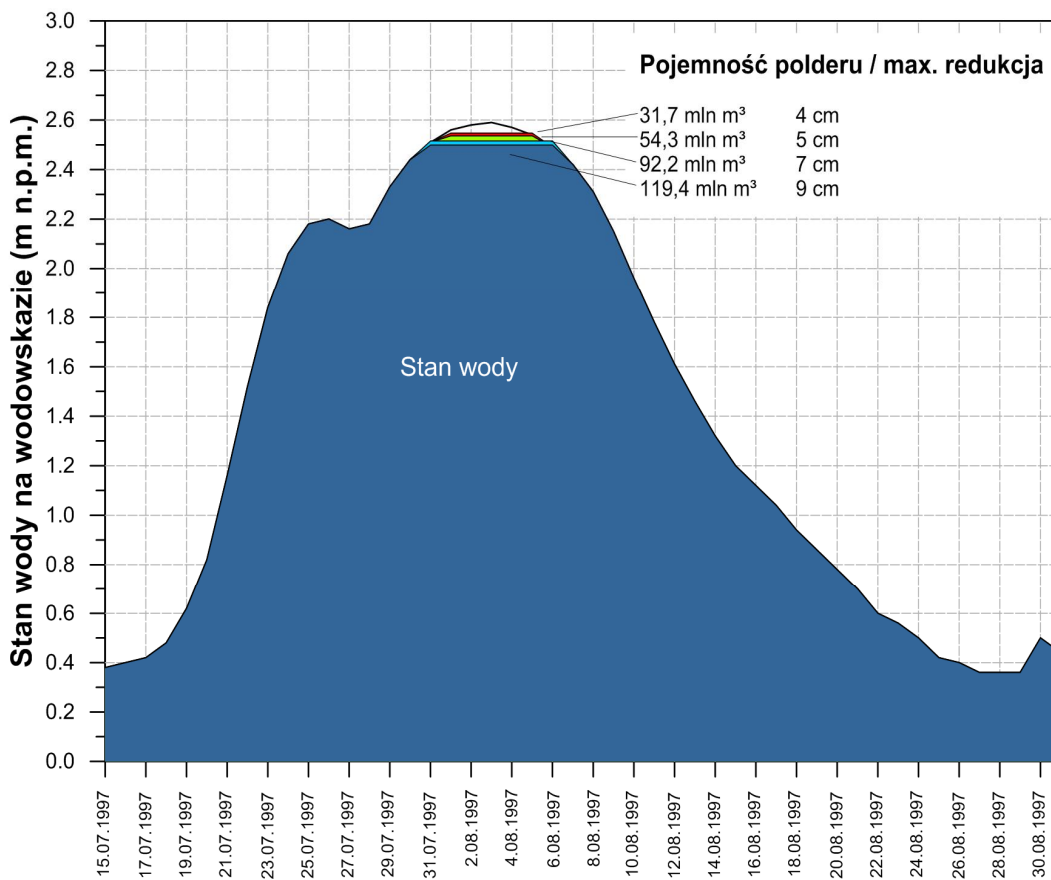
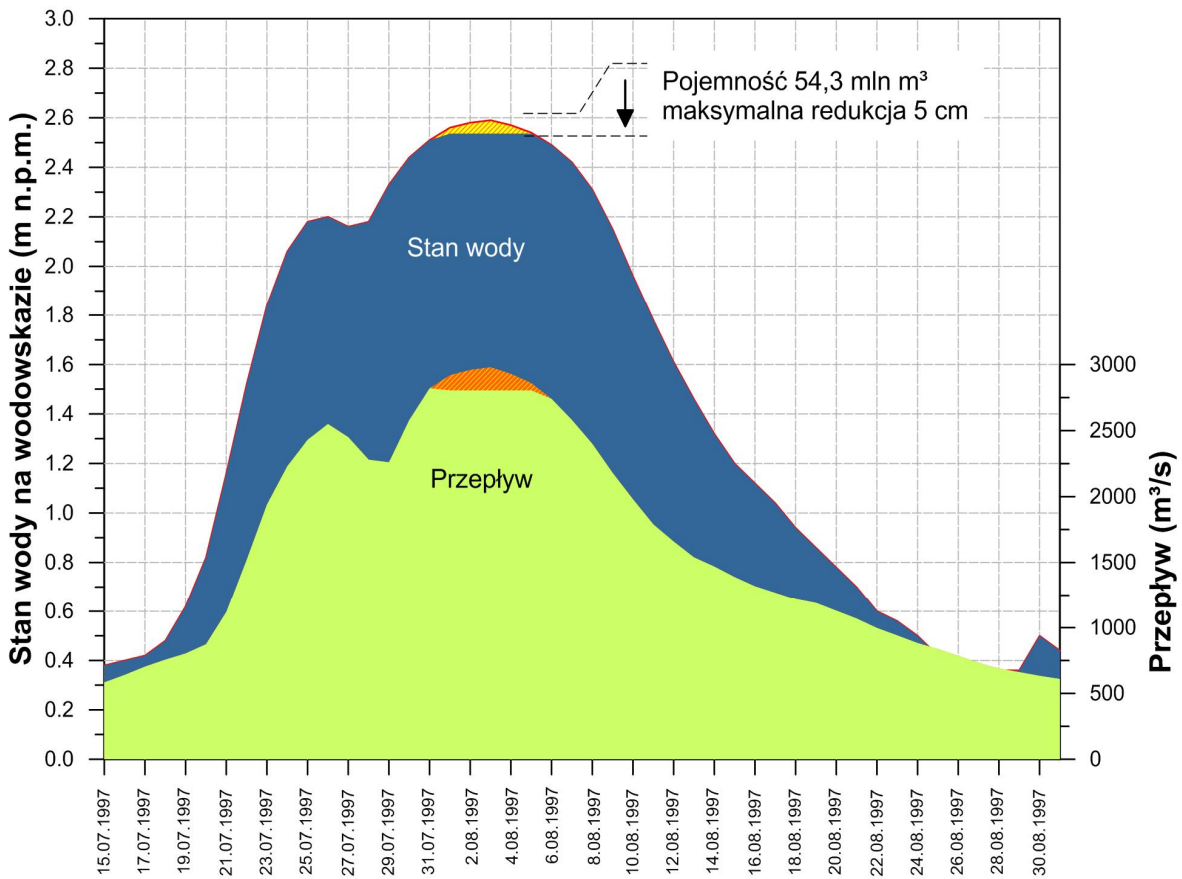
Obliczeń transformacji fali wezbraniowej przez wypełnienie wodą polderu dokonano w trzech etapach:

- Obliczenie objętości przepływu kulminacyjnego, którego część miałaby być zretencjonowana w polderze. Przy zastosowaniu obliczeń iteracyjnych określono wartość przepływu kulminacyjnego, która pomniejszona została dokładnie o ilość wody wypełniającą zalany polder.
- W dniach, w których trwałoby napełnianie polderu podczas powodzi 1997, hipotetyczne stany wody przy przepływie wody pozostałej w korycie obliczono za pomocą krzywej konsumcyjnej.
- Wartość redukcji fali wezbrania uzyskano obliczając różnicę między faktycznym i hipotetycznym stanem wody, obliczonym po odjęciu ilości wody zretencjonowanej w polderze.

Wyniki wariantów obliczeniowych uwzględniające różną pojemność retencyjną polderu zestawione są na ilustracji 32 dla powodzi 2010, a na ilustracji 33 dla powodzi 1997. Ilustracje ukazują każdorazowo dla pojemności retencyjnej 54,3 mln m<sup>3</sup> także wartości przepływu i stanu wody (górna część zestawienia). Na drugim wykresie (zawsze w części dolnej) przedstawiono wyłącznie hydrogramy dla każdego z czterech wariantów obliczeniowych z pojemnością polderu w przedziale od 31,7 do 119,4 mln m<sup>3</sup> (por. Tabela 9).



Ilustracja 32: Wpływ retencji polderowej na przepływy i stany wody Odry w przekroju wodowskazowym Widuchowa w odniesieniu do danych powodzi w roku 2010 (źródło danych: /11/)



Ilustracja 33: Wpływ retencji polderowej na przepływy i stany wody Odry w przekroju wodowskazowym Widuchowa w odniesieniu do danych powodzi w roku 1997 (Dane wodowskazowe: /11/)

Zgodnie z oczekiwaniami, sterowany polder Międzyodrza miałby niewielki wpływ na objętość przepływu powodziowego. Dla powodzi w 2010 w przekroju wodowskazowym Widuchowa 54,3 mln m<sup>3</sup> rozlanej w polderze wody przyniosłoby redukcję fali wezbraniowej maksymalnie o 8 cm. Dla katastrofalnej powodzi 1997 wartość ta zmniejsza się nawet do 5 cm w przekroju wodowskazowym Widuchowa.

Warianty obliczeniowe zakładają uproszczone warunki wyjściowe oraz doskonałe warunki sterowania i wypełniania polderu. Pierwszym przykładem na to, że nie da się tego przełożyć na rzeczywistość, jest fakt, że hydrogramów powodziowych nie da się stworzyć z wyprzedzeniem, co oznacza, że ani regulowania przepływem, ani redukcji fali wezbraniowej nie da się osiągnąć w stopniu idealnym. Dlatego wpływ polderu na transformację fali wezbraniowej musi być w rzeczywistości mniejszy niż to ukazują zaprezentowane obliczenia. Z tej przyczyny precyzyjne obliczenia oddziaływania polderu na transformację fali muszą odbywać się w ramach przewidywania charakterystyki wezbrania przy użyciu hydronumerycznych modeli (2D) - jak na to już wskazano w rozdziale 5.1.3. W takim modelu można byłoby uwzględnić również oddziaływanie obwałowań na przebieg zjawiska powodziowego. Jeśli Międzyodrza stałoby się budowlą regulacyjną, to straciłoby ono swoją dotychczasową funkcję naturalnego przepływowego terenu zalewowego. Oznacza to również zwężenie przekroju przepływu, co skutkować będzie szybszym przyrostem stanów wody. Efekt ten nie mógł być uwzględniony w powyższych obliczeniach.

Wariant obliczeniowy, w którym przyjęta pojemność retencyjna polderu jest największa (119,4 Mln m<sup>3</sup>), obrazuje, że polder zredukowałby falę wezbraniową podczas powodzi 2010 maksymalnie o 19 cm, a podczas powodzi 1997 maksymalnie o 9 cm. Przy czym należy zwrócić uwagę na fakt, że nakład finansowy na budowę koniecznych wyższych wałów stanowi kluczowy element analizy kosztów i zysków przedsięwzięcia. Dodać też trzeba, że obwałowania wymagałyby na długości 65 km zabezpieczeń przed przesiąkaniem i przelewem wody.

Bez numerycznego modelu przepływu nie da się dokładnie określić, jak retencja polderowa oddziaływałaby na stany wody powyżej i poniżej polderu. Bezpośrednio w przekroju wodowskazowym Widuchowa oddziaływanie retencji polderowej jest największe, a z biegiem rzeki zmniejsza się. Należy przyjąć, że najprawdopodobniej wpływ polderu na sytuację powodziową w rejonie Szczecina byłby niezauważalny. Przyczyną tego faktu jest wpływ morza wywołujący cofki (por. rozdział 3.5), na który redukcja fali wezbraniowej oddziałuje w minimalnym stopniu. Zretencjonowane w polderze 54,3 mln m<sup>3</sup> wody stanowią jedynie mniej więcej 5% objętości przepływu w Odrze.

## 5.6 Skuteczność polderu przy redukcji fali wezbraniowej

Dodatkowo do zoptymalizowanego sterowania polderem przedstawionego w rozdziale 5.5, przeanalizowany zostanie poniżej scenariusz redukcji fali wezbraniowej przy przepływach od 1.600 m<sup>3</sup>/s wzwyż. Związane z tą wartością dane pochodzą z historycznych źródeł, które skomentował Kieseritzky (1938): „Obwałowania na powódź letnią Odry Wschodniej mają służyć temu, aby wodę napływającą z góry rzeki utrzymać w przepływie brzegowym [Uw.: tzn. przy stanie wody wypełniającym koryta Odry Wschodniej i Zachodniej do krawędzi brzegów] do przepływu 1600 m<sup>3</sup>/s przy jednoczesnym spiętrzeniu na jeziorze Dąbie do + 0,7 m NN, aby dopiero przy przepływie powyżej tej wartości, nastąpiło wylanie się wody na cały obszar łąk poniżej Crieort [Uw.: Międzyodrza jest częścią tego obszaru] .“ [S. 289].

Wylanie wody już przy wartości 1.600 m<sup>3</sup>/s miałyby utrzymać podpiętrzenie wody na niskim poziomie i dobrze chronić przed zalaniem miejsca w rejonie Cedyni i Przełomu Odry położone tak samo nisko jak Międzyodrza (por. rozdział 5.7).

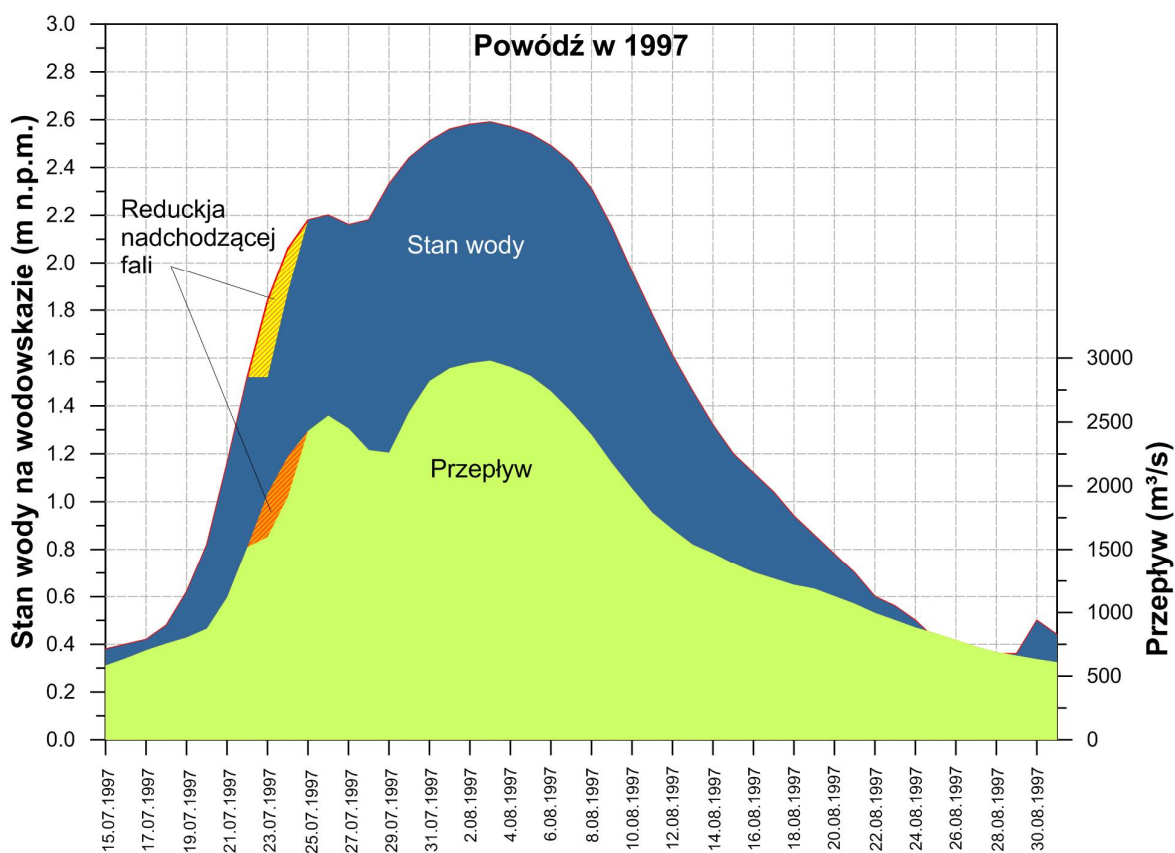
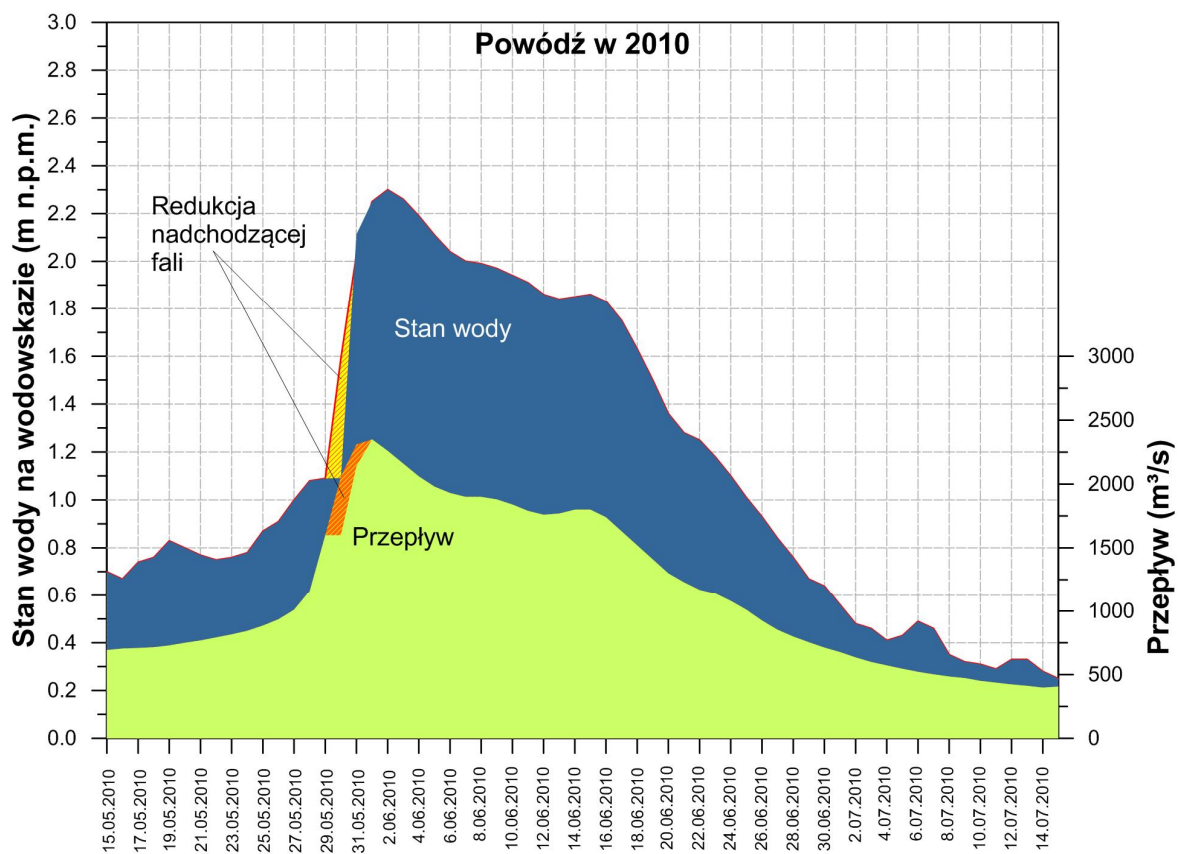
Poniższych obliczeń dokonano metodą opisaną już w rozdziale 5.5. Wcześniej, jeszcze podczas rosnącej fali wezbraniowej, otwarty polder zalewowy pozwala na zmniejszenie przepływu do 460 m<sup>3</sup>/s przy 54,3 mln m<sup>3</sup> objętości retencyjnej. Jest to wysoka wartość, dlatego też polder napełnia się szybko. Tabela 10 zestawia czas wypełniania się polderów z ich objętością. Dla porównania podano również czas od momentu wylewu do momentu nadejścia szczytu fali wezbraniowej.

Tabela 10: Czas wypełniania się polderów przy przepływie od 1.600 m<sup>3</sup>/s oraz czas do nadejścia szczytu fali kulminacyjnej od momentu otwarcia polderu w dobach (d)

Pojemność według	Pojemność retencyjna polderu (mln m <sup>3</sup> )	Czas napełniania Powódź 1997 (d)	Szczyt fali Powódź 1997 w ciągu dni (d)	Czas napełniania Powódź 2010 (d)	Szczyt fali Powódź 2010 w ciągu dni (d)
Atlas Odry	31,7	1,0	12	0,8	3
PAD /2/ poprawiony	54,3	1,5	12	1,2	3
Rozbudowa na SSW	92,2	2,1	12	1,9	3
Rozbudowa ponad SSW	119,4	2,5	12	2,3	3

Z zestawienia wynika, że w każdym z wariantów obliczeniowych poldery zostałyby wypełnione jeszcze przed nadejściem kulminacji fali (czas wypełniania < czas nadejścia kulminacji). Tym samym transformacja fali wezbraniowej nie jest już możliwa, a wezbranie powodziowe przemieszcza się przez region tak, jakby nie było sterowania retencją.

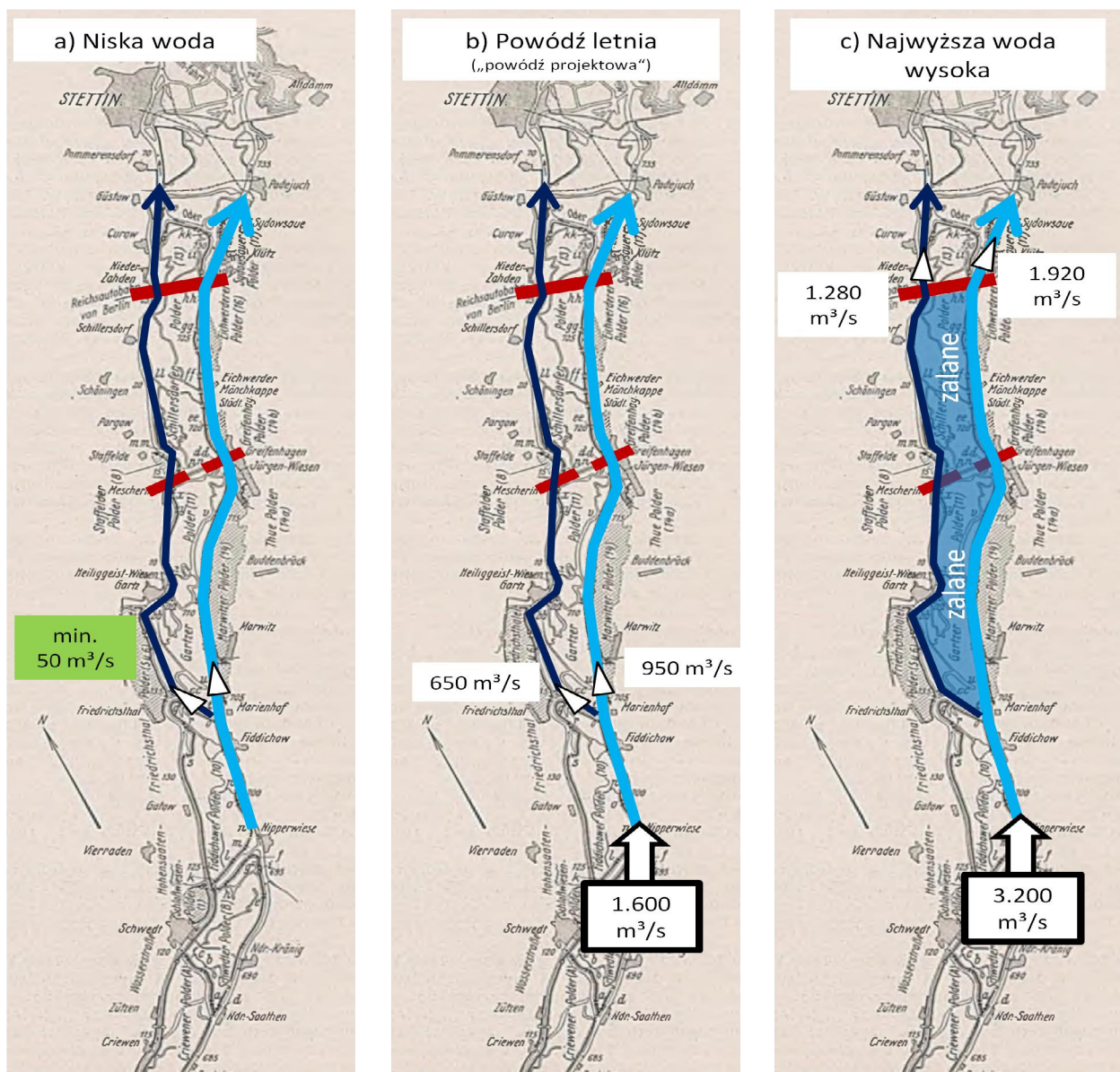
Ilustracja 34 ukazuje dla obu powodzi z lat 1997 i 2010 przykłady obliczeniowe efektu retencji przy pojemności 54,3 mln m<sup>3</sup> zastosowanej przy przepływie od 1.600 m<sup>3</sup>/s. Wyraźnie zauważalne jest, że w momencie nadejścia kulminacji, możliwości retencyjne zostały już w pełni wykorzystane. Sterowanie objętością przepływu od 1.600 m<sup>3</sup>/s jest więc sensowne i skuteczne tylko w przypadku mniejszych wezbrań letnich, czyli zgodnie z pierwotnymi założeniami (Kieseritzky, 1938). Dla wezbrań katastrofalnych z przepływem kulminacyjnym rzędu ok. 2.000 m<sup>3</sup>/s wykorzystanie retencji polderu przyniosłoby efekty jedynie wówczas, gdyby otwarcie wlotu nastąpiło później (por. Rozdział 5.5).



Ilustracja 34: Efekt odprowadzenia 54,3 mln m<sup>3</sup> (pojemność polderu) przy przepływie 1.600 m<sup>3</sup>/s i wwyż na przepływ i stan wody w przekroju wodowskazowym Widuchowa - przykładowo dla powodzi w latach 2010 i 1997 (źródło stanów wód: /11/)

## 5.7 Skutki rozbudowy polderu

Pierwotne, opracowane przed drugą wojną światową, plany zakładały, że wloty do polderów otwierały się przy przepływie  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ . Przy przepływach katastrofalnych woda mogła swobodnie przelewać się przez koronę wałów. Przy przepływie mniejszym niż  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$  wały nie miały znaczenia hydraulicznego i nie powodowały zmian w położeniu zwierciadła wody górnej (Gramberg und Keil, 1938). Jedynie dla mostów na dzisiejszej autostradzie A6 (= A11 po niemieckiej stronie, dalej w kierunku zachodnim) i na trasie dawnej magistrali kolejowej Scheune - Altdamm (dzisiaj Szczecin Gumieńce - Szczecin Dąbie) zaplanowano zbudowanie nasypów, które byłyby zagrożone zalaniem (Ostmann und Keil, 1939). Było to możliwe ze względu na dostatecznie szerokie przekroje przepływu Odry Zachodniej i Wschodniej w rejonie planowanych nasypów, dla których poziom maksymalnej wody wysokiej ustalono na  $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$  bez posiłkowania się objętością retencyjnej polderu. Przy czym ok.  $3/5$  objętości przepływu, czyli  $1.920 \text{ m}^3/\text{s}$ , odpływać miało przez Große Reglitz (Odra Wschodnia) a reszta przez Odrę Zachodnią (Ilustracja 35c).



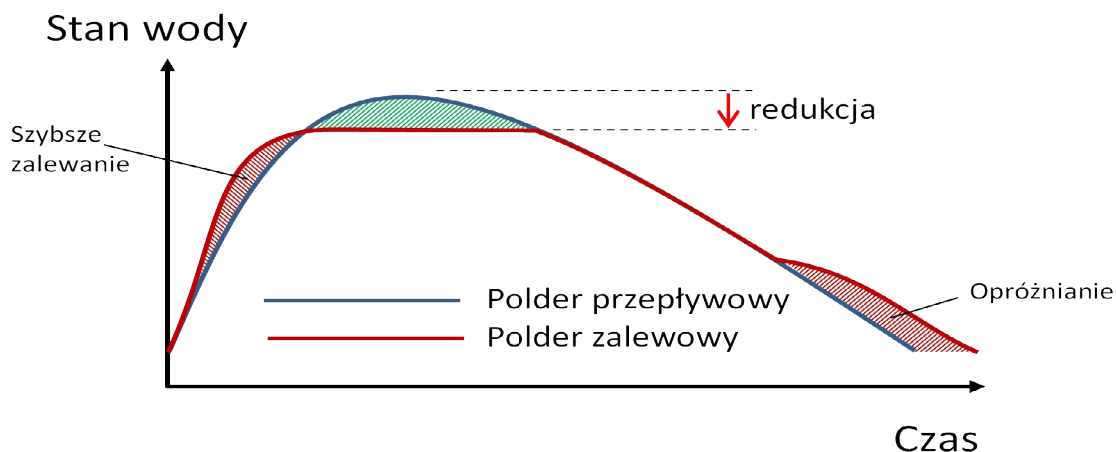
Ilustracja 35: Historyczne dane odnośnie rozdziału przepływu i przepływy miarodajne ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) odnośnie 3 wariantów obliczeniowych przy istnieniu obwałowań (zmod. z Kieseritzky, 1938).

Jeśli obecna rozbudowa polderów Międzyodrza orientować się będzie historycznymi założeniami planistycznymi z niskimi obwałowaniami na powódź letnią, które zakładały wylew wody od przepływu  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ , czyli przy wezbraniach większych przelewanie się wody przez wał na całej jego długości, to zapewniłoby ona ochronę jedynie przed mniejszymi wezbraniami powodziowymi. Ochrona przez większymi wezbraniami nie mogłaby być zapewniona (por. rozdział 5.5 und 5.6).

Wylew wody dopiero przy przepływie powyżej  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$  wymaga intensywniejszej rozbudowy polderu oraz wyższego obwałowania niż zakładają to źródła historyczne. Z powodu zwiększonego podpiętrzania wody konieczne byłyby działania ochronne dla terenów położonych powyżej polderów na Międzyodrzu, a zwłaszcza dla niżej położonych terenów w okolicy Cedyni i Przełomu Odry (por. rozdział 5.6 i 5.7).

Należy wziąć także pod uwagę fakt, że operowanie polderem sterowanym wpływa na charakter hydrodynamiki przepływu powodziowego. Wywołane w ten sposób zmiany można następująco odnieść do stanu obecnego, czyli do Międzyodrza jako naturalnego obszaru zalewowego (por. Ilustracja 36):

- Polder zalewowy pozostaje zamknięty prawie do momentu nadejścia fali kulminacyjnej. Zatem wzbierająca fala ma do dyspozycji zmniejszony przekrój przepływu. Konsekwencją jest szybsze podnoszenie się zwierciadła wody podczas napływu fali, co powoduje spiętrzenie wody większe niż to ma miejsce w przypadku otwartego polderu przepływowego (stan obecny).
- Poprzez otwarcie wlotu polderu i sterowanie jego napełnianiem się, część objętości przepływu powodziowego zostaje przechwycona przez retencję polderową. Objętość przepływu wezbrania zmniejsza się, a dzięki temu zwierciadło wody w rzece podnosi się wolniej lub – w idealnym przypadku – pozostaje na tym samym poziomie.
- Po przepływie kulminacji fali wezbraniowej polder byłby opróżniany. Inaczej niż to jest w przypadku polderu przepływowego, powstawałaby w związku z tym pojawiająca się z niewielkim opóźnieniem fala odpływu wody z polderu (Ilustracja 36).



Ilustracja 36: Porównanie wykresu stanów wody w odniesieniu do polderu przepływowego i sterowanego zalewowego



Jak to już podkreślono w rozdziale 5.5, nakład inwestycyjny na budowę wałów ograniczających jest elementem kluczowym w analizie kosztów i zysków. Im wyższe byłyby budowane obwałowania, tym wyższe byłyby gradienty ciśnienia hydraulicznego a tym samym tak samo wzrastałoby niebezpieczeństwo filtracji wody przez wał czy erozji korony wału przy przelewaniu się wody. Wzrost kosztów inwestycji wzrósłby w takim samym stopniu.

### 5.7.1 Wpływ obwałowań na wezbrania zatorowe

Budowa wałów ograniczających (mowa jest o obwałowaniach na powódź letnią) i zastosowanie polderów sterowanych oddziałuje także na powódzie zimowe, które niosą ze sobą inne wyzwania niż powódzie letnie. Uwzględnić tu trzeba zjawiska lodowe od ich fazy początkowej po możliwość powstania zatoru lodowego oraz wzrost dynamiki hydrogramów powodziowych.

W pierwszej kolejności wały ograniczające chronią przed powodzią spowodowaną zatorami lodowymi – w przypadku takich powodzi stany wody mogą w przeciągu 1-2 dni podnieść się lokalnie o ponad 2 m, lub odwrotnie przy zastosowaniu akcji lodolamania tak samo szybko opaść /6/. Ekstremalne wahania położenia zwierciadła wody i związany z tym wzrost ciśnienia porowego i filtracja wody stanowią dla wałów bardzo duże obciążenie. Do tego dochodzi erozja wywołana spływającą przy pochodzie lodu krą /6/. Wały ograniczające w rejonach hydraulicznych przewężeń muszą być skonstruowane tak, aby stawić czoła takim obciążeniom, co wiąże się z dużym nakładem inwestycyjnym.

Przyrost stanów wody przekroju przepływu ograniczonym po bokach obwałowaniami jest szybszy, co skraca czas przygotowania działań interwencyjnych. Jednak podwyższenie wałów ograniczających z zasady nie chroni przed powstawaniem zatorów lodowych (Bervaes, 1990).

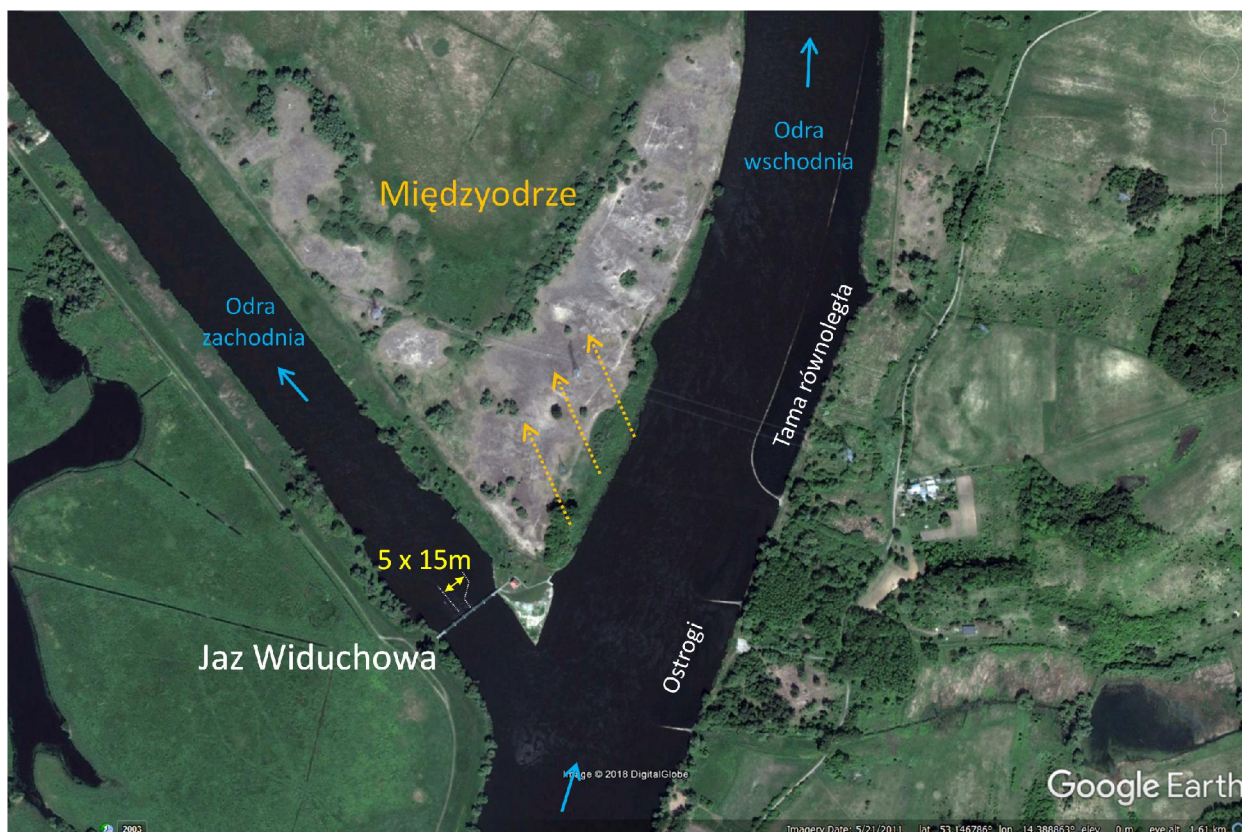
W przypadku gdy wody wezbraniowe przeleją się przez wały ograniczające, zmniejsza się objętość przepływu w korycie głównym, co z kolei jest niekorzystne dla spływu lodu i stabilności pokrywy lodowej. Przystosowanie wałów do bocznego przelewania się wody wymaga odpowiedniej konstrukcji budowlanej z wykorzystaniem progów, rowów melioracyjnych i niskiego nachylenia ścian wałów, co także oznacza wzrost nakładu inwestycyjnego.

Międzyodrze w swojej obecnej formie otwartego i płaskiego polderu przepływowego stwarza dobre warunki retencji kry, zmniejszając tym samym jej ilość w korycie rzeki. Mała prędkość przepływu na Międzyodrzu powoduje, że kra odkłada się w płaskich miejscach i nie przemieszcza się w dół rzeki. Dzięki temu zmniejsza się ilość kry w głównym nurcie koryta, a to obniża niebezpieczeństwo powstania zatorów lodowych dalej w dole rzeki.

### 5.7.2 Kluczowy punkt jaz w Widuchowej (niem.: Marienhofer Wehr)

Pokrywa lodowa i zatory lodowe tworzą się tam, gdzie tuż pod powierzchnią wody znajdują się przeszkody, w rejonie łuków cieku lub w miejscach zmniejszonego spadku. Poza tym także w przewężeniach, na odcinkach o długich i głębokich przekrojach lub w wypłyceńiach, na których może zbijać się nanoszona kora (Beltaos, 1995).

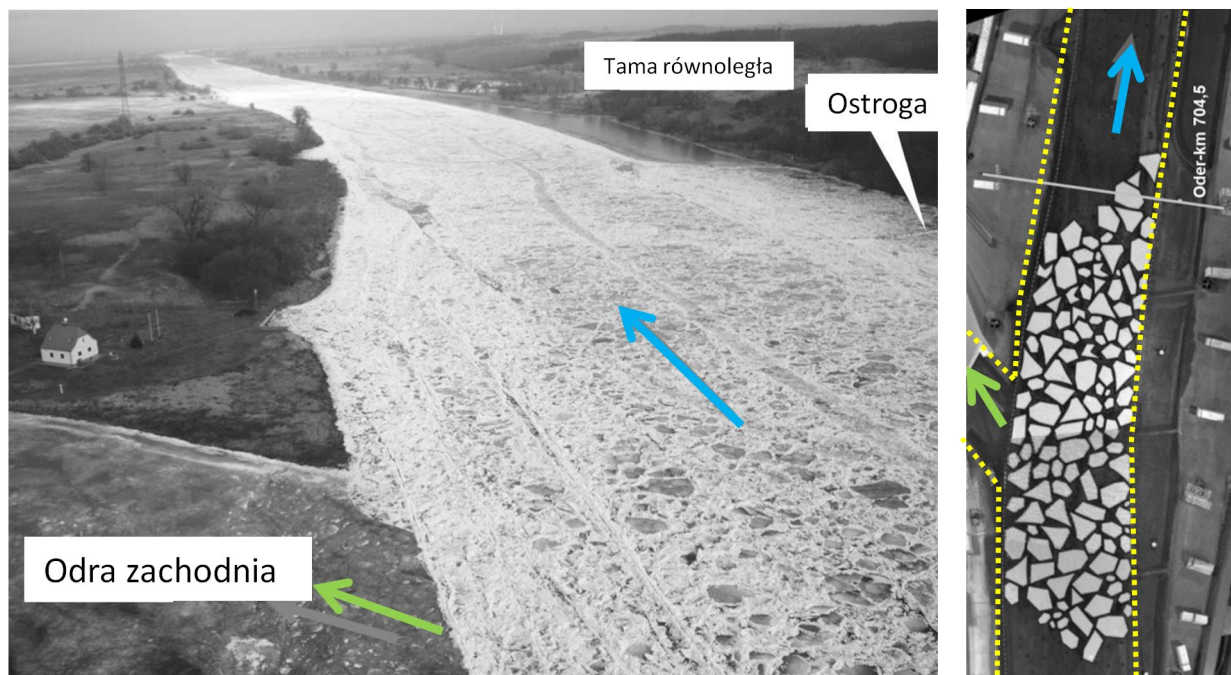
Punktem kluczowym w powstawaniu zatoru lodowego na Międzyodrzu jest jaz w Widuchowej (niem.: Marienhofer Wehr) (Ilustracja 37).



Ilustracja 37: Jaz w Widuchowej/niem: Marienhofer Wehr (google earth)

Jaz w Widuchowej podzielony jest na 5 przęseł o świetle 15,6 m każda i kontroluje rozrząd wody na dwa nurty pomiędzy Odrą Zachodnią i Odrą Wschodnią. Każde przęsło podzielone jest na sekcje, przez których wąskie otwory kora praktycznie się nie przedostaje, co skutkuje powstawaniem w rejonie jazu zatorów lodowych. Do tego dochodzą ostrogi i długa tama podłużna na Odrze Wschodniej. Budowle te wpływają niekorzystnie na spływ lodu w rejonie rozwidlenia rzeki (Hentschel und Höger, 2014).

Ilustracja 38 przedstawia lód na Odrze w styczniu 2009. Napływająca kora piętrzy się i tworzy zator lodowy na jazu w Widuchowej; zatory w tym miejscu mogą wypiętrzyć się do 3 m nad lustrem wody.



Ilustracja 38: Spiętrzenie lodu 26.01.2009 (Zdjęcie: Rent-a-drone) i zbierające się atrapy kry na 704,5 km w fizycznym modelu BAW (zmod. z Hentschel i Höger, 2014)



Ilustracja 39: Zator na jazu w Widuchowej (niem: Marienhofer Wehr) w dniu 23.12.2010 (źródło: <http://rzgw.szczecin.pl/>)

Z powodu tego faktu, WSA Eberswalde zleciła BAW przeprowadzenie na rozwidleniu Odry Wschodniej i Zachodniej eksperymentu badawczego z plastikowymi atrapami kry (Ilustracja 38, fotografia z prawej strony). Badania wykazały, że dla wody średniej ( $245 \text{ m}^3/\text{s}$ ), zamknięcie jazu w Widuchowej podwyższa zdolność spływu lodu do 2 km w dół rzeki. Linia nurtu staje się bardziej wyprostowana, a dzięki temu lód przemieszcza się w dół sprawniej, co zmniejsza niebezpieczeństwo powstawania zatorów. BAW badała również, czy zmiany parametrów geometrii przekroju cieku mają wpływ na spływ lodu, jednak wyniki były negatywne.

Badania BAW zasadniczo wykazują, że odprowadzenie części objętości przepływu z głównego koryta rzeki (tutaj: Odra Wschodnia) prowadzi do pogorszenia się warunków spływu lodu. Jaz w Widuchowej działa jak lokalnie skoncentrowany pobór wody z odpowiednio wysokimi przypowierzchniowymi prędkościami wody, co utrudnia spływ lodu. Z hydraulicznego punktu widzenia odpowiada to odprowadzeniu części przepływu przez urządzenie wpustowe

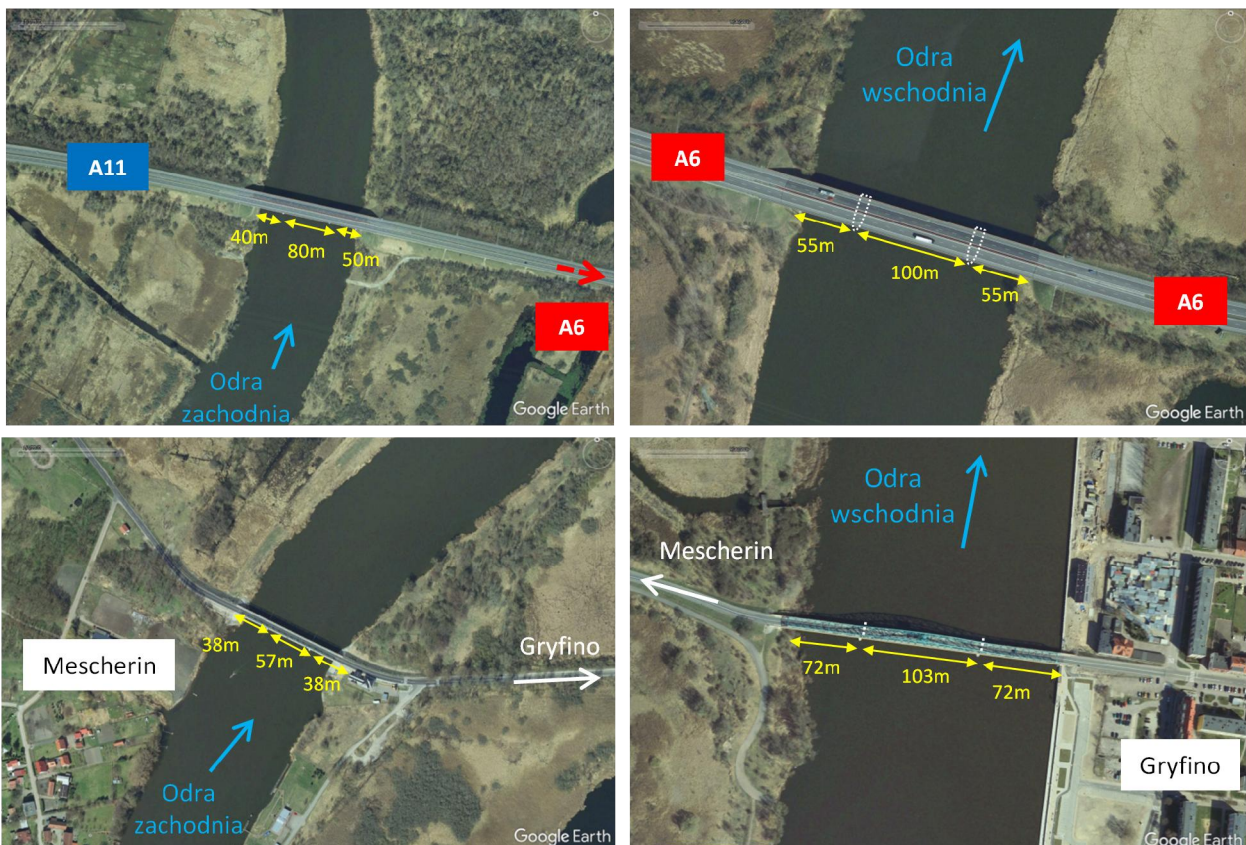
sterowanego, ograniczonego obwałowaniami polderu. W przypadku otwartego polderu przepływowego, jak to jest obecnie, wylew rozpoczyna się wcześniej i jest wielkopowierzchniowy, dzięki czemu lokalna koncentracja prądu ma mniejsze nasilenie, a tym samym zmniejsza się niebezpieczeństwo powstania zatoru lodowego.

W przypadku, gdy zator lodowy utworzyłby się na otwartym jazie w Widuchowej i/lub na otwartych urządzeniach wpustowych polderu, zmniejszony przez obwałowania przekrój przepływu spowodowałby przyspieszenie podnoszenia się zwierciadła wody na Odrze Wschodniej. Oznaczałoby to, że woda w przeciągu krótkiego czasu przelałaby się przez wały ograniczające. To z kolei wiąże się z niebezpieczeństwem powstania zatoru lodowego na obwałowaniach, a tym samym z dalszym podnoszeniem się zwierciadła wody w Odrze – aż do momentu przerwania wałów, które tak dużego nacisku w opisanych warunkach nie dałyby rady wytrzymać.

Rozbudowanie naturalnego polderu przepływowego (stan obecny) do polderu sterowanego z urządzeniami wpustowymi i wałami ograniczającymi prowadziłaby tym samym do pogorszenia się sytuacji podczas powodzi zimowej. Jak już na to wskazano w rozdziałach 5.6 i 5.7.1, byłoby niezwykle trudno skonstruować wały ograniczające, które potrafiłyby stawić czoła tak dużym obciążeniom.

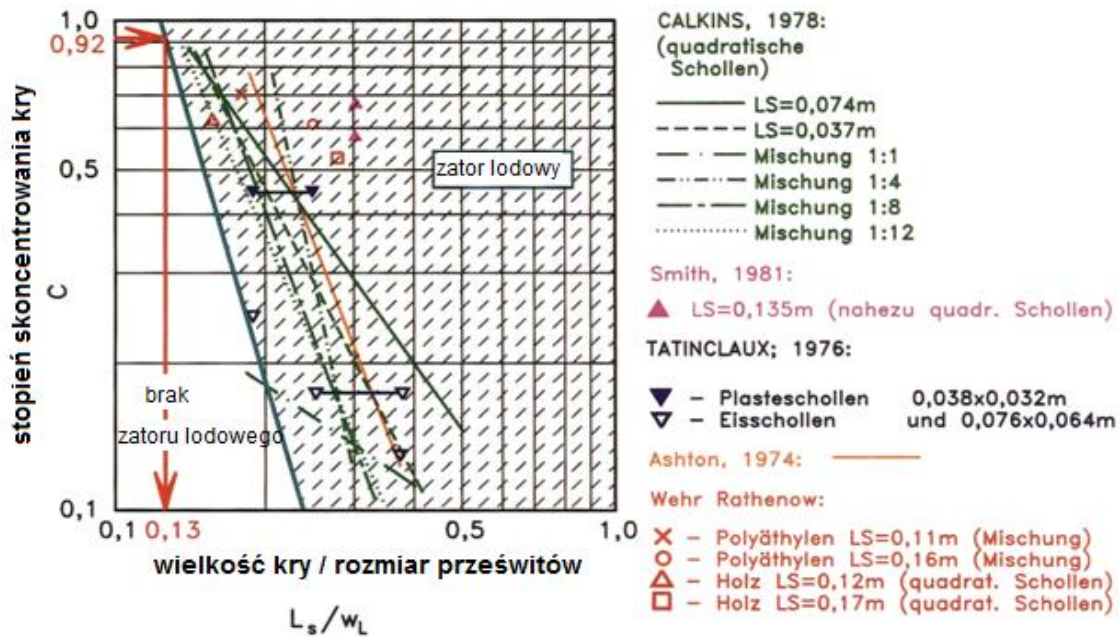
### 5.7.3 Punkty kluczowe przy mostach na dolnej Odrze

Kolejnymi miejscami tworzenia się zatorów lodowych są przewężenia przy mostach na Odrze Zachodniej i Wschodniej (Ilustracja 40). W przypadku mostów uwzględnić trzeba zmniejszenie przekroju przepływu przez osadzone na brzegach przyczółki oraz odległości między filarami mostu - im mniejszy jest ten odstęp, tym większe jest ryzyko powstania zatoru lodowego. Najważniejszym kryterium jest ilość ładunku lodu, czyli masa napływającego lodu w danym przedziale czasu na metr szerokości koryta cieku oraz wielkość kry i rozkład prądów w rejonie mostu. Rozchodzi się tu o napływ i odpływ, który może być zakłócony przez zlokalizowanie mostów w rejonie ostrych łuków, polderów, obwałowań, budowli regulacyjnych czy ławic piasku /6/.



Ilustracja 40: Mosty na Odrze Zachodniej i Wschodniej i ich krytyczne dla tworzenia się zatorów wymiary prześwitów (google earth, dane odnośnie Gryfino - Mescherin wg Östmann i Keil, 1939)

Ryzyko powstania zatoru lodowego w rejonie mostu rośnie wraz ze wzrostem ilości i rozmiarów napływającej kry. Zależność tę obrazuje schemat na Ilustracja 41. Spośród wielu parametrów wyjściowych związanych z problemem gromadzenia się lodu w rejonie mostów, ujęto tylko dwa, tzn. stopień skoncentrowanie lodu, czyli stopień pokrycia powierzchni wody lodem i stosunek rozmiarów kry do rozmiaru prześwitów między przęsłami.



Ilustracja 41: Niebezpieczeństwo powstania zatoru w odniesieniu do rozmiarów prześwitów i kry oraz stopnia skoncentrowania kry (Alexy, 1998 w /6/)

Dla przykładu przy koncentracji kry wartości 0,92 (czyli kra pokrywa 92% powierzchni wody) stosunek rozmiarów kry do rozmiarów prześwitów musi być mniejszy niż 0,13, aby kra nie zatrzymywała się. Czyli przy prześwicie szerokim na ok. 100 m, jak to ma miejsce w przypadku mostów na Odrze Wschodniej, bez problemu przepływać będzie kra mniejsza niż 13 m. Na Odrze Zachodniej, ze względu na mały prześwit między przęsłami problemy sprawia już kra większa niż 7,5 m.

Dlatego bardzo korzystna jest retencja kry z Odry Wschodniej i Zachodniej na Międzyodrzu. W tym celu Międzyodrze powinno być w miarę możliwości zalewane na całej jego powierzchni już przy niskich przepływach, tak jak to ma miejsce w czasie pochodu lodów.

Dla mostów na Odrze Wschodniej ochrona przed napływającą krą będzie w przyszłości coraz ważniejsza, gdyż modernizacja elektrowni „Dolna Odra” w Gryfinie zredukowała napływ do rzeki ciepłej wody z jej układu chłodniczego. Z tego powodu w przyszłości należy liczyć się na całej Odrze Wschodniej z tym, że lód będzie się tworzył wcześniej, a jego pokrywa będzie grubsza. W okresie pękania lodu oddziałuje to niekorzystnie, gdyż ze względu na niższą temperaturę wody topnienie kry odbywa się wolniej, a tym samym wzrasta ryzyko powstawania zatorów lodowych na całej długości Odry Wschodniej. Budowa wałów ograniczających i utrata Międzyodrza jako obszaru naturalnej retencji kry (jak to jest obecnie), ryzyko to dodatkowo podwyższy.

## 5.8 Ocena koncepcji ochrony przeciwpowodziowej „Polder Międzyodrze”

Na stosunki wodne w rejonie polderu Międzyodrza wpływają nie tylko przepływy na Odrze. Zależą one także od stanów jeziora Dąbie. Sytuacja na jeziorze z kolei uzależniona jest od stanów Zalewu Szczecińskiego i Bałtyku. Wpływ cofki wiatrowej jest natomiast znikomy i na jeziorze Dąbie i na Odrze.

Zwierciadło wody w rejonie Międzyodrza ma w związku z tym kształt krzywej spiętrzenia, która przebiega asymptotycznie pomiędzy nachylonym położeniem zwierciadła wody swobodnie płynącej Odry, a praktycznie horyzontalnym poziomem wody morza (jeziro Dąbie). Poprzez krzywą spiętrzenia oba ciała wodne są ze sobą hydraulicznie sprzężone. Dla przykładu podwyższony stan morza wpływa na zmniejszoną przepustowość przepływu w Odrze. Z fizycznego punktu widzenia strumień wody w Odrze natrafia na zmniejszoną różnicę poziomów i przez to ubywa mu energii.

Już w swojej obecnej formie polder Międzyodrza, bez dodatkowych inwestycji, spełnia funkcję naturalnej retencji jako polder przyływowy, na który wylewają się wody powodziowe. Hydrauliczne oddziaływanie polega w pierwszym rzędzie na powiększeniu przekroju przepływu Odry. Obniża to stany wody podczas wezbrania - w przeciwieństwie do sytuacji, w której Międzyodrza nie byłoby zalewane. Większy przekrój przepływu ma także pozytywne oddziaływanie na spływ lodów, ponieważ zmniejsza się niebezpieczeństwo powstawania zatorów lodowych w rejonie mostów.

Planowana rozbudowa Międzyodrza do polderu sterowanego podąża innym tokiem myślenia. Zakłada ona wykorzystanie retencji polderu do redukcji fali powodziowych na Odrze. Jednakże na wodowskazie miarodajnym w Widuchowej hydrogramy powodzi ukazują kulminacje powodziowe już w formie spłaszczonej – jak to wyraźnie widać w przypadku powodzi z lat 1997 i 2010. Nawet idealnie sterowany polder, przy pełnym wykorzystaniu pojemności retencyjnej polderu, redukuje falę powodziową na odcinku Widuchowa – Szczecin jedynie o kilka centymetrów. Jednocześnie utracona zostałaby obecna rola polderu przepływowego, co skutkowałoby spiętrzeniem spływającej wody, a tym samym zwiększyłoby się ryzyko powodziowe dla miejscowości położonych w górę rzeki. Także w przypadku powodzi zimowej podwyższone wały ograniczające pogorszyłyby sytuację spływu lodu, gdyż wzrosłaby ilość kry w korycie głównym, co z kolei zwiększyłoby ryzyko powstawania zatorów lodowych. Ogólnie rozbudowa polderu i obwałowań zwiększyłaby zagrożenie powodziowe na dolnej Odrze.

Aby zmniejszyć zagrożenie przeciwpowodziowe na dolnej Odrze, trzeba pracować nad obniżeniem stanów w jeziorze Dąbie, czyli nad ochroną przed wpływem wysokich stanów Zalewu Szczecińskiego i – ostatecznie - Bałtyku.

Poprawę funkcjonowania obecnie istniejącego polderu przepływowego można by osiągnąć poprzez budowę przepustów pod nasypem autostrady A6 (= A11 po niemieckiej stronie, dalej na zachód), co należałoby zbadać.

## 6 Koncepcja regulacji cieków przez WSA Eberswalde

### 6.1 Powód i zdefiniowane zadania koncepcji regulacji cieków

Podstawę koncepcji, a tym samym przeprowadzonych przez BAW badań tworzą „Tezy do późniejszego uregulowania prawnego celem wspólnej poprawy sytuacji na drogach wodnych na pograniczu polsko-niemieckim (ochrona przeciwpowodziowa, warunki przepływu i żeglugi)” /16/. Ustalono w nich, że średnia głębokość wynosić ma 1,80 m z prawdopodobieństwem przekroczenia 80% powyżej i 90% poniżej ujścia Warty.

Istotnym punktem jest przy tym zapewnienie skutecznej akcji lodołamania przez lodołamacze w celu ochrony przed powodzią zatorową. Podawane średnie głębokości orientują się przy tym zanurzeniem użytkowanej na Odrze floty lodołamaczy: *„Docelowe głębokości wody odpowiadają wymaganiom odpowiadającym akcji lodołamania z użyciem lodołamaczy i należy zagwarantować je w możliwie skutecznym sposób.”* [1/, S. 24].

Tabela 11: Niemiecka flota lodołamaczy (Informacja prasowa WSA Eberswalde z dnia 05.01.2011)

Nazwa	Typ łodzi	Długość / Szerokość [m]	Zanurzenie min / max [m]	Moc [kW]
Schwedt	Neubau	33,20 / 8,53	1,55 / 1,86	810
Kietz	Neubau	33,20 / 8,53	1,55 / 1,86	810
Frankfurt	Oder	33,25 / 8,62	1,55 / 1,86	700
Hohensaaten	Oder	29,24 / 7,28	1,48 / 2,00	529
Usedom	Oder	30,82 / 7,36	1,60 / 2,10	485
Kienitz	Oder	30,31 / 7,33	1,64 / 1,84	660

Zanurzenie w ruchu lodołamacza to wartość pomiędzy zanurzeniem minimalnym i maksymalnym plus 0,2 m osiadania w rejonie rufy (informacje o danych technicznych lodołamaczy wykorzystywanych na Łabie, informacja prasowa WSA Lauenburg, 2013). Konstrukcja techniczna lodołamaczy wyznacza zatem w koncepcji regulacji cieków parametry do jakich ma być rozbudowana regulacyjnie Odra.

Ponieważ lodołamacze muszą nawigować w całej szerokości rzeki, głębokości średnie mają decydujące znaczenie (zobacz też rozdział 6.2). Stanowią one podstawę obliczeń żeglowności dokonanych na potrzeby orzeczenia KRC: „Ponadto lodołamacze nie przemieszczają się w wąskiej ograniczonej w swym zasięgu rynnie żeglugowej, lecz na całym obszarze cieków pomiędzy brzegami. Stąd w celu spełnienia zasadniczego celu badań w postaci zagwarantowania wystarczających głębokości dla potrzeb lodołamania, rozważanie analityczne wąskiego szlaku żeglownego jest bezprzedmiotowe..” [1/, S. 81].

BAW nie zajmowała się badaniem warunków występujących przy zjawiskach lodowych: „Jednakże dla potrzeb użycia lodołamaczy przebieg trasy żeglugowej nie może być poddany badaniu, ponieważ dno Odry pod zamkniętą powłoką lodową wykształca się całkowicie inaczej, niż ma to miejsce w modelu. Na chwilę obecną nie ma jeszcze w dyspozycji żadnej wiedzy analitycznej odnośnie form dna i ruchu ławic piachu pod lodem na Odrze, w związku z czym zjawisk tych nie można poddać modelowaniu.” [1/, S. 79]

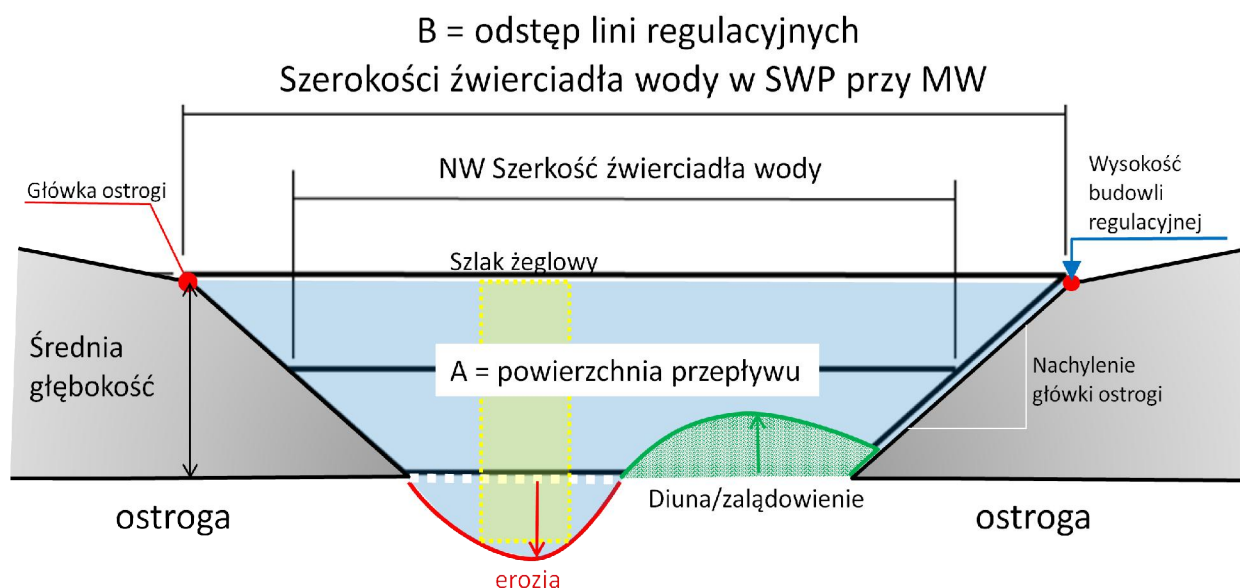


Jednakże nie ma dowodu na to, że lodołamacze mają problemy z miejscami limitowanych głębokości. Rząd Brandenburgii (MLUL) w odpowiedzi na oficjalne zapytanie w tym temacie (nr 1839) odpowiedział: „W ostatnich latach nie zdarzyły się przypadki, że praca lodołamaczy została uniemożliwiona z nazwanych w zapytaniu powodów.” [Pytanie 11 w: Drucksache Landtag Brandenburg 6/4619]. Zatem podstawowa teza stwierdzająca konieczność realizacji koncepcji regulacji cieków jest według obecnej wiedzy analitycznej czysto hipotetyczna.

## 6.2 Definicja średniej głębokości wody

Głębokość wody wyznacza z jednej strony położenie dna, a z drugiej stan wody. Ze względu na nieregularną strukturę dna z nakładającymi się na siebie formami dennymi koryta posilkowano się w obliczeniach orzeczenia KRC uśrednioną wartością głębokości. W orzeczeniu KRC przedstawione jest to następująco: „Praca z użyciem pojęcia średniej głębokości wody jest konieczna, ponieważ z powodu bardzo kompleksowych i wysoce dynamicznych warunków na dnie Odry, nie jest możliwe na podstawie czysto teoretycznych rozważań określenie głębokości w szlaku żeglownym możliwej do wykorzystania przez żeglugę.” [1/, S. 5]

Do uśrednienia wartości głębokości analiza BAW posługuje się metodą zastępczego przekroju trapezu (zob. rozdział 6.1). Wartość głębokości średniej obliczana jest poprzez uśrednienie powierzchni, czyli poprzez uśrednienie powierzchni ciągu przekrojów poprzecznych na danym odcinku. W tym celu formy denne i przegłębienia przy główkach ostróg/wyplycznia przeliczone są na ujednoczoną konfigurację przekroju poprzecznego (Ilustracja 42).



Ilustracja 42: Definicja głębokości średniej i tranzytowej w przekroju poprzecznym (zmod. z [1/])

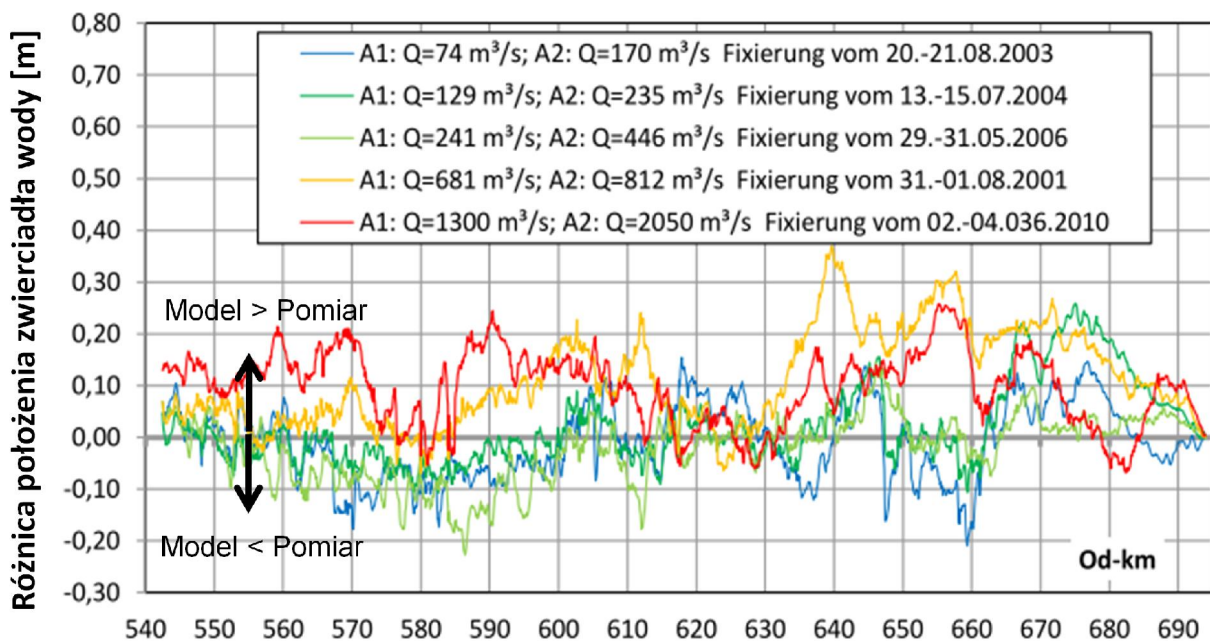
Z tego powodu definicja głębokości limitowanej w orzeczeniu KRC odnosi się zawsze do większego odcinka dna, który odpowiada co najmniej kwadratowi szerokości rzeki. Metoda ta prowadzi do tego, że zmieniające swoją formę łachy piasku czy asymetryczne przekroje na łukach cieków „znikają” po uśrednieniu.

### 6.3 Metodologia zastosowana przez BAW

Przeprowadzone przez BAW badania: „(...) koncentrują się zasadniczo na opracowaniu założeń i zasad regulacji na potrzeby modyfikacji istniejącego stanu zabudowy Odry granicznej.“ [1/, s. 25]. Wypracowane warianty regulacji obejmują ujednoczenie, remonty i modyfikację konstrukcji ostróg od 540 do 682 km rzeki. Jednakże na niektórych odcinkach modyfikacja ta oznacza znaczącą przebudowę ostróg. Rozpatrywane były przy tym różne warianty zmian parametrów geometrii odstępów linii regulacyjnych i (projektowanych) wysokości budowli regulacyjnych (por. Ilustracja 42).

Na podstawie danych z natury BAW opracowała model Odry granicznej. Składają się na niego model fizyczny odcinka w rejonie Hohenwutzen i jednowymiarowy model numeryczny przepływu i transportu materiałów stałych obejmujący całą Odrę graniczną (1D-FTM).

Dla hydraulicznej kalibracji modelu użyto ujęcia poziomów zwierciadła wody przy różnych przepływach. Kalibracja wykazuje przy tym najmniejsze średnie odchylenie przy przepływach niskich, jednak lokalnie występują wahania do ponad 0,20 m (Ilustracja 43). W takim samym przedziale występują również wahania przy przepływach wyższych, które przy przepływach powodziowych osiągają wartość ponad 0,30 m (km 640 / 658). Widać tu wyraźnie, że powiązanie ruchów oporu (rozkład szorstkości) wody w Odrze ze zmieniającą się pod wpływem przepływu geometrią dnu w modelu przysparza w dalszym ciągu dużo problemów.



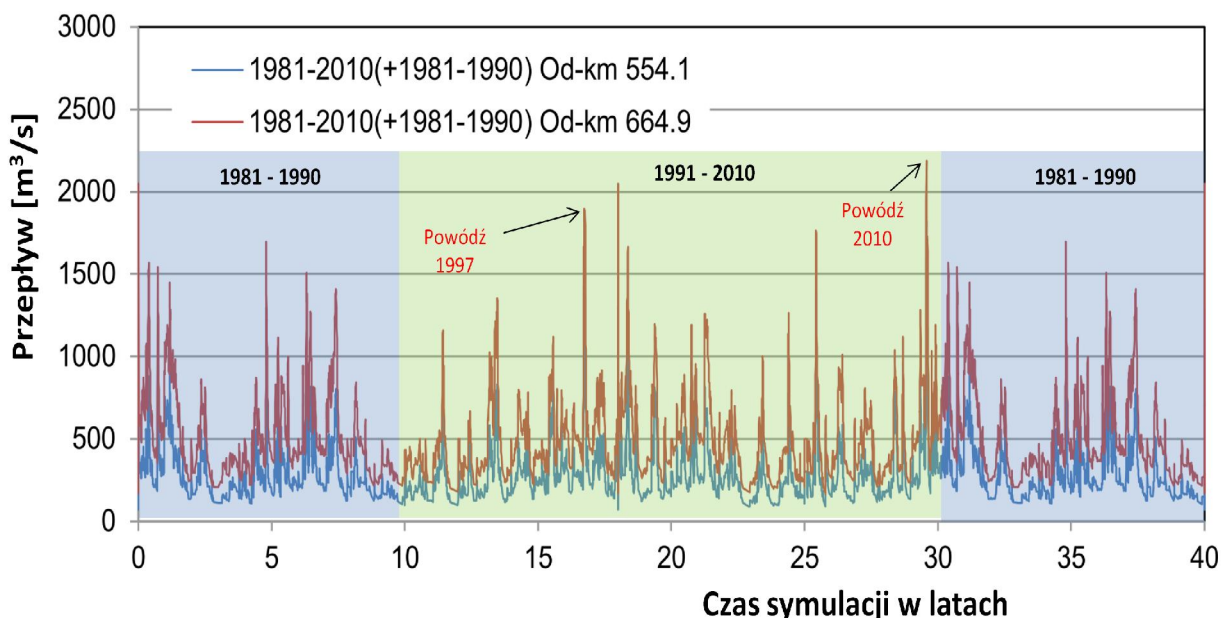
Ilustracja 43: Zależna od przepływu różnica między obliczeniowym i zmierzonym położeniem zwierciadła wody (z /1/)

Dlatego wskazuje się w orzeczeniu KRC, że kalibracja morfologiczna w modelu numerycznym 1D-FTM wiązała się z problemami, w związku z czym musiano posiłkować się licznymi założeniami [1/, S. 39 ff.]. Wkład materiału stałego musiał być tak długo kalibrowany i dopasowywany, aby średnia wysokość dna ani nie wzrastała (akumulacja osadu), ani nie malała (erozja dna), orzeczenie KRC nazywa to „stanem równowagi morfologicznej“.

Szczególnie niepewna analitycznie jest wartość dostawy rumowiska z Warty, ponieważ istnieje na ten temat niewiele danych. Odnośnie tego zagadnienia czytamy w orzeczeniu KRC: „Pomijając 2 pojedyncze pomiary z [65], nie ma w dyspozycji jakichkolwiek danych o nanosie materiału stałego z Warty.“ [1/, s. 70]. O tym że nieznaną wartość tego ważnego czynnika, ma duże znaczenie dla wyników obliczeń, mówi się w orzeczeniu KRC otwarcie: „W toku kalibrowania modelu stwierdzono szczególną wrażliwość dna Odry na wpust rumowiska wleczonego z Warty.“ [1/, S. 70]. W konsekwencji prowadzi to do argumentu, że „[...] jednak ta niepewność analityczna modelu w jednakowy sposób wpływa także na obliczenia symulacyjne dla wariantów w odniesieniu do wypowiedzi o podstawowym ich działaniu i zaszeregowaniu, to możliwe jest mimo to wydanie sprawdzonej analitycznie prognozy.“ [1/, S. 72].

Wynika z tego, że jakościowe określenia poszczególnych wariantów dały się sformułować, jednak ze względu na niepełne dane o sytuacji w ujściu Warty i o oddziaływaniu ujścia dopływu na ten odcinek, obliczenia szacunkowe wartości ilościowych mogą być dokonane jedynie w przybliżeniu.

Obliczenia na modelu numerycznym 1D-FTM sięgają 40 lat w przyszłość. Dla wyznaczonego okresu prognozowania przeprowadzono najpierw obliczenia na danych z wielolecia 1981 – 2010, a dane z wielolecia 1981 - 1990 dołączono powtórnie i otrzymano w ten sposób sekwencję zestawioną (Ilustracja 44). Cała sekwencja obejmuje więc powódzie z lat 2010 i – zwłaszcza – 1997; ta druga jest uznawana za powódź stuletnią.



Ilustracja 44: Prognozowany hydrogram na okres 40-letni, przyjęty w preferowanym przez BAW wariantcie KRC-V5 (zmod. z 1/1 Bild 5-5)

Dopiero w roku 2012 dostępne były dalsze dane: „Dane dla całego wielolecia 1971 do 2010 były dostępne w połowie 2012 roku tak, że obliczenia dla wariantów W0, KRC-W1 (KRC = Koncepcja Regulacji Cieków) i wariantu preferowanego KRC-W4 przeprowadzone zostały na zestawionym wieloleciu, a oprócz tego także na pełnym wieloleciu 1971 do 2010.“ [1/, S. 47]

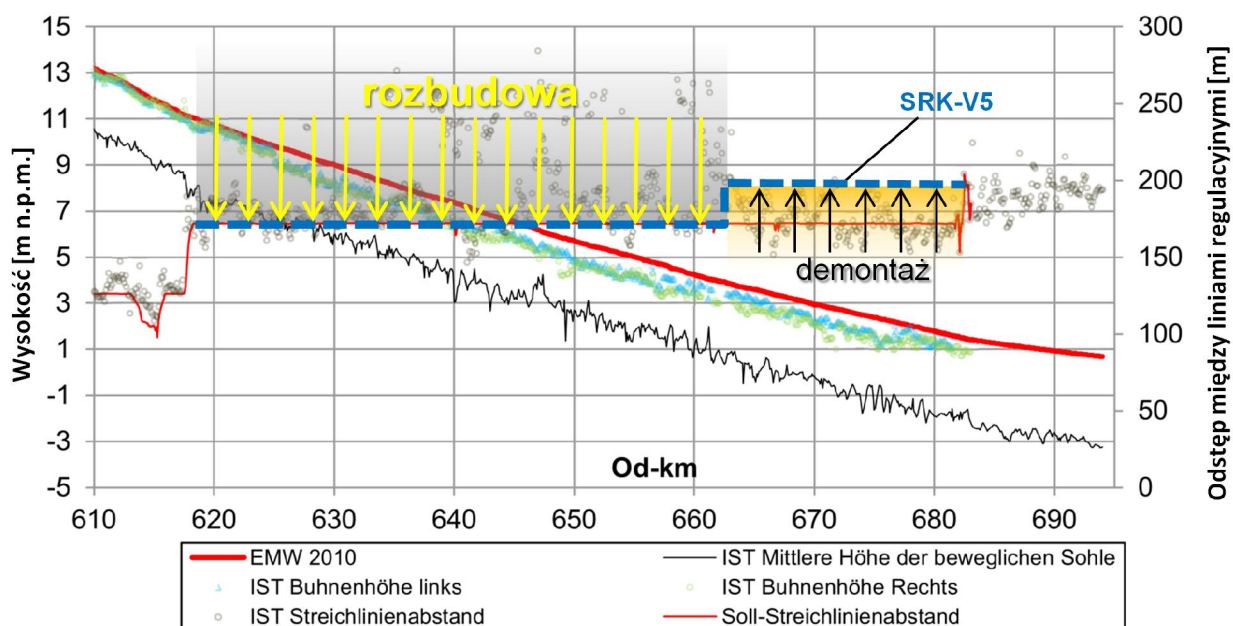
## 6.4 Wariant preferowany przez BAW

Preferowany wariant KRC-V5, który BAW zaleciła do realizacji, obejmuje zestawione w Tabeli 12 działania. Średnia woda SWP<sub>2010</sub> to obliczeniowy stan wody, uzyskany z wielolecia 1981 - 2010 przy przepływie rzędu 300 m<sup>3</sup>/s powyżej ujścia Warty i 500 m<sup>3</sup>/s poniżej.

Tabela 12: Zestawienie działań preferowanego przez BAW wariantu KRC-V5 (Źródło: /1/)

km Odry	Działanie BAW KRC-W5
cały odcinek	Ujednolicenie i naprawa ostróg
542 - 585	Zwiększenie odstępów między liniami regulacyjnymi do 126 m spłaszczenie główek ostróg do 1:10
585 - 618	Zmniejszenie odstępów między liniami regulacyjnymi do 126 m spłaszczenie główek ostróg do 1:10
618 - 662	Zmniejszenie odstępów między liniami regulacyjnymi do jednakowego wymiaru 172 m
662 - 682	Zwiększenie odstępów między liniami regulacyjnymi do 186 m
540 - 618	Wysokość projektowa główek ostróg przy poziomie SWP <sub>2010</sub>
618 - 625	Stopniowe dopasowanie planowanej wysokości z SWP <sub>2010</sub> na SWP <sub>2010</sub> minus 0,5 m
625 - 682	Wysokość projektowa główek ostróg na poziomie SWP <sub>2010</sub> minus 0,5 m

Co konkretnie oznaczają planowane działania w stosunku do stanu obecnego, obrazuje Ilustracja 45. Na odcinku między 620 a 662 km rzeki ostrogi musiałyby być wydłużone nawet do 100 m, aby zastosować planowany odstęp linii regulacyjnych 172 m. Oznaczałoby to znaczącą ingerencję w Odrę.

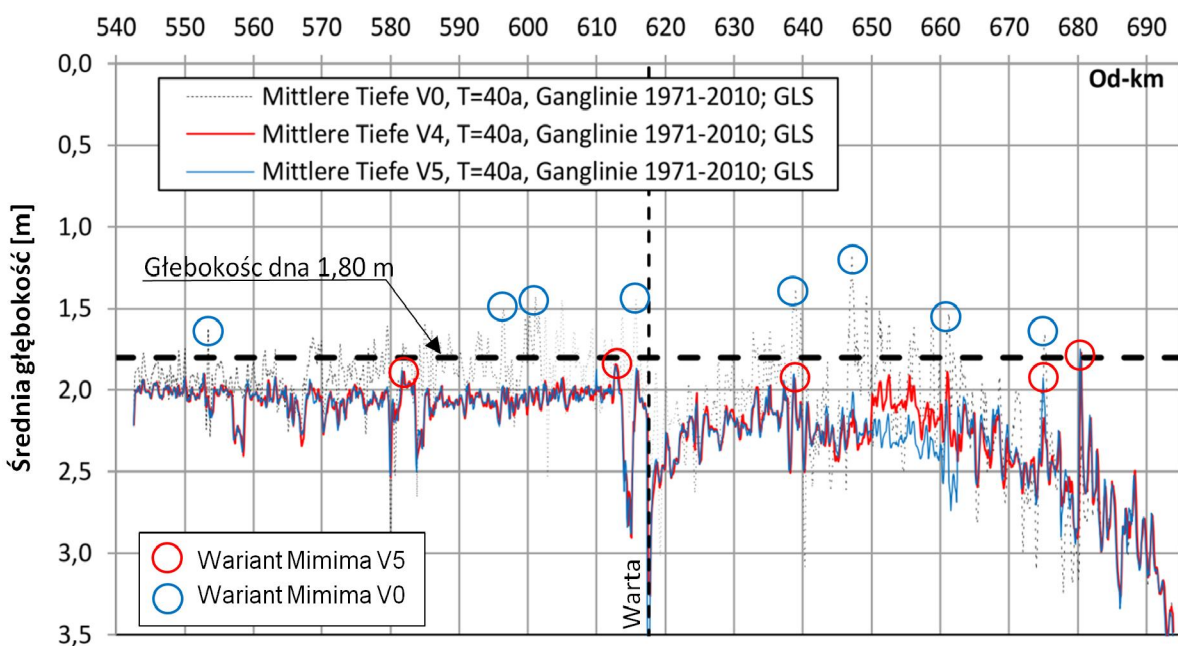


Ilustracja 45: Odstępy między liniami regulacyjnymi i wysokość ostróg (IST / projekt wg KRC-W5) na odcinku 2 (zmod. z /1/)

### 6.4.1 Oddziaływanie preferowanego wariantu KRC-V5

Aby dokonać oceny oddziaływania działań regulacyjnych, trzeba uwzględnić zarówno zmiany średniej wysokości dna (erozja lub nanos osadów) jak i zmiany położenia zwierciadła wody. Z sumy tych zmian rezultuje zmiana średniej głębokości wody.

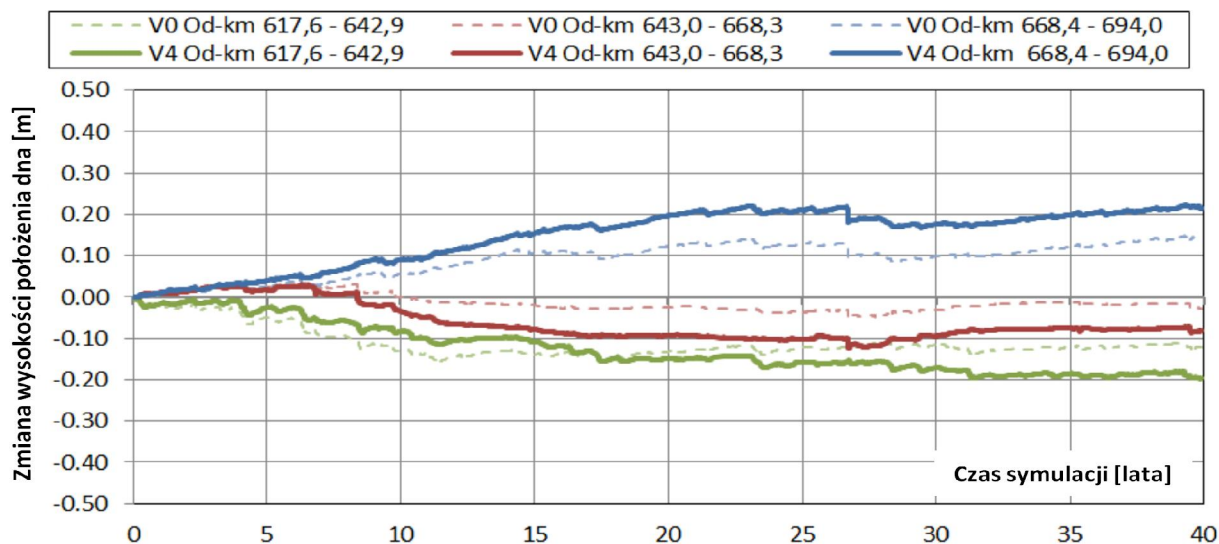
Ilustracja 46 przedstawia stan prognozowany w modelu numerycznym 1D-FTM po 40 latach odnośnie wariantu V4, wariantu preferowanego V5 i bez przeprowadzania działań (V0). Przekrój podłużny ukazuje głębokości średnie na przestrzeni całego badanego odcinka i miejsca wypłycone jako szczyty wykresu.



Ilustracja 46: Głębokości średnie stanu prognozowanego po 40 latach bez przeprowadzenia działań (V0) i po przeprowadzeniu działań preferowanego wariantu (V5). Głębokość wody odnosi się do przepływów  $Q_{P\ddot{U}80}$  względnie  $Q_{P\ddot{U}90}$  (Ilustracje 6-77 zmod. z /1/)

Dostrzega się tu wyraźnie, że miejsca limitujące głębokość są w orzeczeniu KRC ważne i miarodajne. Średnie położenie dna jest obniżane aż do momentu, gdy na wypłyconach zostanie osiągnięta głębokość projektowa 1,80 m. Warianty V5 i V4 osiągają ten cel w przedstawionych prognozach. W wyniku prac regulacyjnych na całym odcinku Odry granicznej – za wyjątkiem miejsc limitujących głębokość – głębokość wody zostanie podniesiona ponad wymaganą wartość 1,80. Koncepcja kompleksowej rozbudowy regulacyjnej jest tym samym niewspółmierna i nieekonomiczna.

Pogłębiającą się pod wpływem erozji dennej część obrazuje w odniesieniu do podzielonej na trzy odcinki Odry granicznej poniżej ujścia Warty Ilustracja 47. Nie zawiera ona danych preferowanego wariantu V5, dlatego porównanie musi być dokonane w oparciu o dane wariantu V4, którego dane różnią się jedynie na odcinku od km 650 do 663, gdzie występują głębokości mniejsze o ok. 0,2 m (por. Ilustracja 46).



Ilustracja 47: Prognozowana w modelu numerycznym 1D-FTM zmiana wysokości położenia dna poniżej ujścia Warty bez działań KRC (V0) i po przeprowadzeniu działań wariantu V4 (Ilustracje 6-71 z /1/)

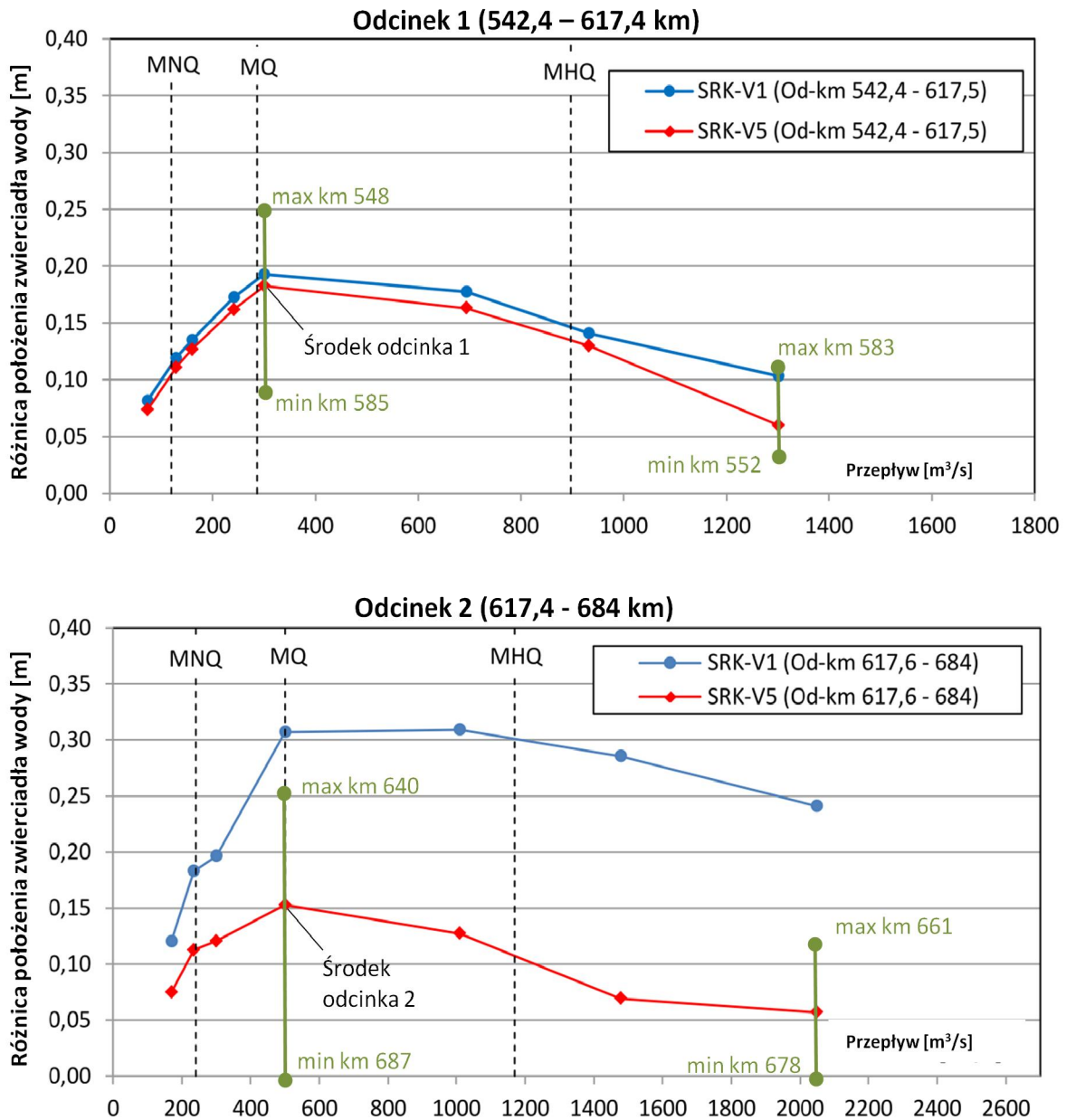
Model prognozuje podwyższenie się po 40 latach rzędnej dna o 0,2 m jedynie w odniesieniu do najniższego odcinka Odry granicznej na km 668,4 - 694,0 (a więc 5 mm/rok). Na innych odcinkach dojdzie do erozji. Poniżej ujścia Warty wyniesie ona na km 617,6 0,1 - 0,2 m (2 - 5 mm/rok).

Prognoza rozwoju dna bez przeprowadzania działań KRC (V0) ukazuje tendencje podobną, cechującą się erozją dna na odcinku górnym, a jego podwyższeniem na odcinku dolnym. Odcinek środkowy pozostaje w dużej mierze stabilny i pozostaje w stanie morfologicznej równowagi. Wartości zmian w dnie są jednak o 30 – 50% mniejsze niż to ma miejsce w przypadku realizacji wariantu V4 i mieszczą się w przedziale poniżej 0,4 mm/rok. Na realność tych prognoz patrzeć trzeba naturalnie w kontekście niepewności analitycznej obliczeń modelowych, zwłaszcza tych związanych z praktycznie nie rozpoznaną ilością dostawy rumowiska z Warty.

Spoglądając na rozwój dna Odry w ostatnich 50 latach (rozdział 4.1) prognoza pogłębienia się dna na odcinku od ujścia Warty do rejonu poniżej Hohenwutzen bez przeprowadzania działań KRC jednak zaskakuje. Według obliczeń modelowych tendencja do podwyższania się rzędnej dna zachowa się tylko na dolnym odcinku (od km 668), który i tak wykazuje dostateczne głębokości, a tym samym nie wymaga działań regulacyjnych w celu zagwarantowania minimalnej głębokości tranzytowej.

#### 6.4.2 Oddziaływanie preferowanego wariantu KRC-V5 na zjawiska powodziowe

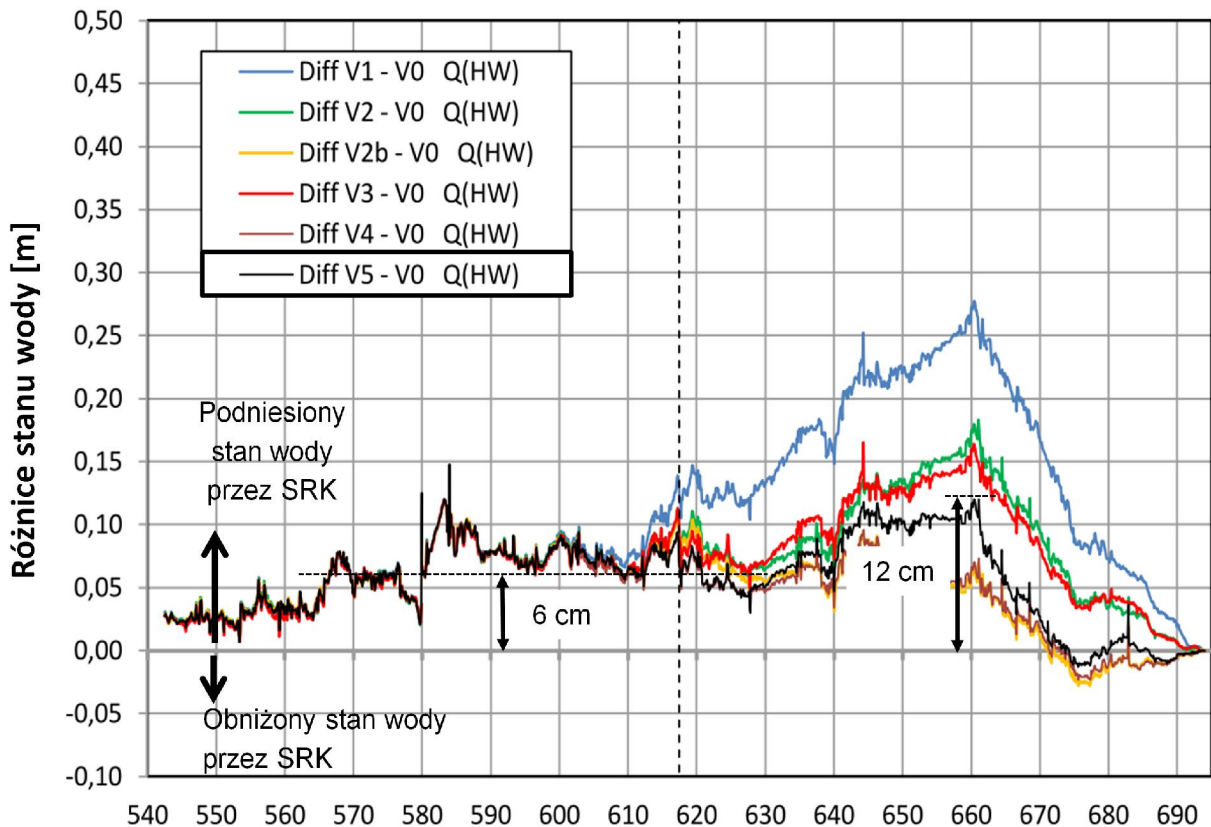
KRC opracowano fokusując się na wodę średnią, czyli na przepływ 300 m<sup>3</sup>/s powyżej i 500 m<sup>3</sup>/s poniżej ujścia Warty. Działania zaplanowano tak, aby przynosiły dobre efekty przy średnich stanach wody, a tym samym również podczas powodzi ze zjawiskami lodowymi zimą. BAW dokonała również obliczeń uzupełniających odnośnie efektów przy przepływach niskich i powodziowych. Wyniki tych obliczeń przedstawia w odniesieniu do poszczególnych odcinków Ilustracja 48.



Ilustracja 48: Oddziaływanie preferowanego wariantu KRC-V5 na zmiany położenia zwierciadła wody jako uzależnione od przepływu średniego dla obu odcinków. Zielone pola określają lokalne maksimum i minimum odchylenia oraz kilometr rzeki na którym występują (zmod. z /1/)

Wynika z nich, że rozbudowa ostróg prowadzi do przyrostu stanów wody także przy przepływach mniejszych i większych niż średnie. Przy niskich stanach wody należy zjawisko to ocenić pozytywnie, jednakże przy przepływach powodziowych o natężeniach 1.300 m<sup>3</sup>/s powyżej i 2.050 m<sup>3</sup>/s poniżej ujścia Warty (tzn. mniej więcej pomiędzy HQ<sub>5</sub> a HQ<sub>10</sub>) ryzyko powodziowe rośnie, gdyż obliczenia preferowanego wariantu orzeczenia KRC V5 wykazują podwyższenie położenia zwierciadła wody o 0,05 – 0,06 m.

Lokalnie może wystąpić nawet większy wzrost położenia zwierciadła wody, jak to przedstawia Ilustracja 49. Najwyższe podwyższenie zwierciadła wody wynikające z realizacji preferowanego wariantu KRC V5 wynosiłoby 0,12 m na 661 km Odry.



Ilustracja 49: Zmiany położenia zwierciadła wody wywołane realizacją wariantów KRC po 40 latach przy średnim przepływie rzędu ok. od  $HQ_5$  do  $HQ_{10}$  (zmod. z /1/)

Do przepływów powodziowych większych niż  $HQ_{5-10}$  orzeczenie KRC odnosi się następująco: „Natomiast bezpośrednio wypowiedzi dotyczące podniesienia wody powodziowej przy zjawiskach ekstremalnych (np.  $WQ_{100}$  lub powyżej) z modelu 1D-MTR są obarczone niepewnością analityczną, ponieważ zjawiska te, w szczególności dla odcinka 1, dalece wykraczają ponad spektrum kalibracji.“ [1/, s. 159].

## 6.5 Ocena koncepcji regulacji cieków (KRC)

Opracowany przez BAW model numeryczny 1D-FTM, za pomocą którego przebadano poszczególne warianty obliczeniowe orzeczenia KRC, opiera się na jednowymiarowych wzorach transportu rumowiska. Oznacza to, że oblicza on uśrednione wartości położenia dna w odniesieniu do czasu i przestrzeni, a zatem nie może uwzględnić ani diun, ani ich rzędnych. W akcji łamania lodu przy użyciu lodołamaczy znaczenie mają jednak właśnie diuny i ich rzędne, a nie uśrednione położenie dna (por. rozdział 6.1).

Geometria diun nie jest statyczna, zmienia się wraz ze zmianą natężenia przepływu. Koncepcja regulacji cieków prowadzi etapami do wzrostu erozyjnego oddziaływania rzeki, aby uzyskać większą średnią głębokość wody. Jednak jednocześnie może zwiększyć agradację diun, czego orzeczenie KRC nie uwzględnia. Przy wartościach w przedziale 0,1 - 0,3 m, jakie w procesie pogłębiania dna stawia sobie za cel KRC, zmiana geometrii diun jest prawdopodobna. W takim przypadku zamierzone pozytywne oddziaływanie budowli regulacyjnych KRC zostałyby zniweczone.



Działania KRC prowadzą do przyrostu stanów wody także podczas wezbrań powodziowych. Jest wątpliwe, aby było to zgodne z założeniami kompleksowej koncepcji ochrony przeciwpowodziowej dla Odry.

Zasadniczo modelowanie zawiera tyle niepewności analitycznych, że rodzi się wątpliwość, czy opracowany model i wykorzystane do badań BAW dane wejściowe mogły wygenerować wiarygodne wyniki w przedziale wartości decymetrowych i w prognozie o horyzoncie czasowym 40 lat. Dotyczy to zarówno parametrów hydraulicznych jak i morfologicznych. Dla przykładu odchylenia w modelowym położeniu zwierciadła wody znajdują się w tym w przedziale wartości, w jakim zawierają się wartości spodziewanych efektów głębokościowych uzyskanych po realizacji koncepcji KRC. BAW wskazuje również na niepełność danych wejściowych, zwłaszcza w przypadku nanosu rumowiska z Warty, odnośnie którego znane były wyniki jedynie dwóch pomiarów (por. rozdział 6.1): „Długookresowe prognozy w rzece morfologicznie aktywnej, jak np. Odra graniczna, są zawsze powiązane z relatywnie dużą niepewnością analityczną. Ani nie są znane szczegółowe dane dla stanu istniejącego, ani istotne parametry dla przyszłości, jak np. przepływy na krawędziach wejścia do modelu i nanos rumowiska, nie mogą być dokładnie zaprognozowane. Do tego na Odrze jako czynnik niepewny analitycznie dochodzi fakt, że nanos materiałów stałych z rzeki Warty jest elementem jeszcze dalece nierozpoznanym. Także występująca prawie corocznie stała pokrywa lodowa oddziałuje na transport materiałów stałych, a tym samym na procesy rozwojowe dna, w nieznanym sposób.“ [1/, s. 174]

Początkowo wyremontowane ostrógi zwiększą szorstkość, co doprowadzi do podwyższenia położenia zwierciadła wody i pogłębienia dna. W dłuższej perspektywie jednak procesy morfologiczne i erozja ostróg spowodują pomniejszenie skuteczności tego efektu i sytuacja powróci do stanu wyjściowego. Głębokości będą tak samo liminitowane – jednakże ich poziom odniesienia będzie znajdował się niżej.

Rozbudowa regulacyjna polegająca na zmniejszeniu odstępów pomiędzy liniami regulacyjnymi zwiększa erozję i podwyższa położenie zwierciadła wody w stopniu jeszcze większym niż ma to miejsce w przypadku naprawy istniejących ostróg. Jednak z upływem czasu szorstkość maleje, a zachowanie celu głębokościowego wymaga stałych prac utrzymaniowych. Jednak silna erozja spowoduje, że w dłuższej perspektywie czasu położenie zwierciadła wody i tak będzie miało tendencję do stałego obniżania się.

Doświadczenia pochodzące z innych dużych rzek jak Łaba, dolny Ren, Wisła czy silnie uregulowany odcinek Odry środkowej potwierdzają fakt, że zwierciadło wody po rozbudowie ostróg w dłuższej perspektywie czasowej dopasowuje się do zerodowanego dna. Efektem jest opadanie poziomu wody gruntowej, co jest katastrofalne dla nadrzecznych łągów.

W Niemczech według zaleceń Ramowej Dyrektywy Wodnej cała Odra graniczna, wraz z Odrą Środkową (DE\_RW\_DEBB6\_3) i Odrą Dolną (DE\_RW\_DEBB6\_2), według obowiązującego „zaktualizowanego planu gospodarowania wodami zgodnie z artykułem 13“ dyrektywy 2000/60/EG wzgl. § 83 WHG niemieckiej części obszaru dorzecza Odry (IFGE Oder) zakwalifikowana została na „okres gospodarowania od 2016 do 2021“ jako **naturalna jednolita część wód**. Dlatego osiągnięty i zachowany zostać musi co najmniej dobry ekologiczny stan

wód. „Poprawa potencjału ekologicznego Odry granicznej [...]“ [1/ S. 37], odnosi się, jak to określa orzeczenie KRC, tylko do HMWB (heavily modified waterbodies) i nie spełnia znacznie wyższych kryteriów dostosowanych do wymogów RDW celów planu gospodarowanie wodami na Odrze granicznej. Czynnikiem podstawowym w tym względzie jest oczywiście dopasowanie aktów prawnych w Polsce i Niemczech odnośnie realizacji wymogów RDW.

## 7 Alternatywne formy ochrony przeciwpowodziowej

### 7.1 Działania zastępujące akcje lodołamania z wykorzystaniem lodołamaczy

Tezy opracowanej przez WSA Eberswalde koncepcji regulacji cieku postulują konieczność zapewnienia minimalnej głębokości tranzytowych w Odrze po to, aby zagwarantować możliwość akcji lodołamania przez flotę lodołamaczy. Dane konstrukcyjne lodołamaczy wyznaczają więc parametry rozbudowy regulacyjnej Odry. Jednakże nie ma dowodów na to, że lodołamacze w ogóle mają kłopoty z głębokościami limitującymi (zob. rozdział 6.1).

Nawet przy założeniu, że hipoteza ta mogłaby zostać udowodniona i lodołamacze nie przepłynęłyby odcinków o głębokości mniejszej niż 1,80 m, da się przecież zagadnienie odwrócić i konstrukcję lodołamaczy przystosować do warunków panujących w Odrze, a nie odwrotnie.

Przykładem są potrafiące pływać koparki typu „AMPHIBEX“ (Firma Normrock), które w Kanadzie z powodzeniem wykorzystywane są do akcji lodołamania na nizinnych rzekach. Zanurzenie takich pływających koparek wynosi 0,6 m, napędzane są śrubami i poruszają się samodzielnie po lodzie wykorzystując łyżkę koparkową tak, że około połowa 20 ton ciężaru własnego może być użyta do łamania lodu. Nakład inwestycyjny to około 0,8 mln euro za jedną maszynę.

Wadą tych koparek jest ich mała prędkość w porównaniu do szybkości poruszania się konwencjonalnych lodołamaczy. Dlatego trzeba byłoby opracować koncepcję łączącą lodołamanie przy użyciu koparek-amfibii i konwencjonalnych lodołamaczy, np. poprzez stacjonowanie koparek w pobliżu miejsc krytycznych, gdzie często tworzą się zatory lodowe, lub na odcinkach charakteryzujących się występowaniem miejsc głębokości limitujących. Alternatywą mógłby być szybki transport specjalistycznymi pojazdami transportu ciężkiego. Przy czym wykorzystanie analizy zdjęć satelitarnych i prognoz zjawisk lodowych mogłoby się znacząco przyczynić do zwiększenia operatywności i efektywności akcji lodołamania (Kögel et al., 2017).

Akcje lodołamania – tak jak do tej pory – mogłyby rozpoczynać się od jeziora Dąbie i posuwać dalej w górę Odry. W miejscach, gdzie lodołamacze przejść nie mogą, np. w miejscach limitowanych głębokości, wykorzystywane byłyby koparki-amfibie, które torowałyby drogę lodołamaczom.



Ilustracja 50: AMPHIBEX AE450E działający jako lodołamacz (<http://www.normrock.ca/> i <https://i.cbc.ca/>)

## 7.2 Metody postępowania i problemy z miejscami limitującymi głębokość

### 7.2.1 Identyfikacja miejsc limitujących głębokość

Jak to przedstawiono w rozdziale 6.4.1, koncepcja regulacji cieką KRC zorientowana jest na obniżanie średniego położenia dna tak długo, aż w miejscach limitowanych głębokości uzyska się planowaną wartość 1,80 m. średnie położenie dna określone zostaje metodą zastępczego przekroju trapezu (zob. rozdział 6.2). Różnorodnie wykształcone dno Odry przekształcone zostaje w jednorodną pionową konfigurację profilu poprzecznego.

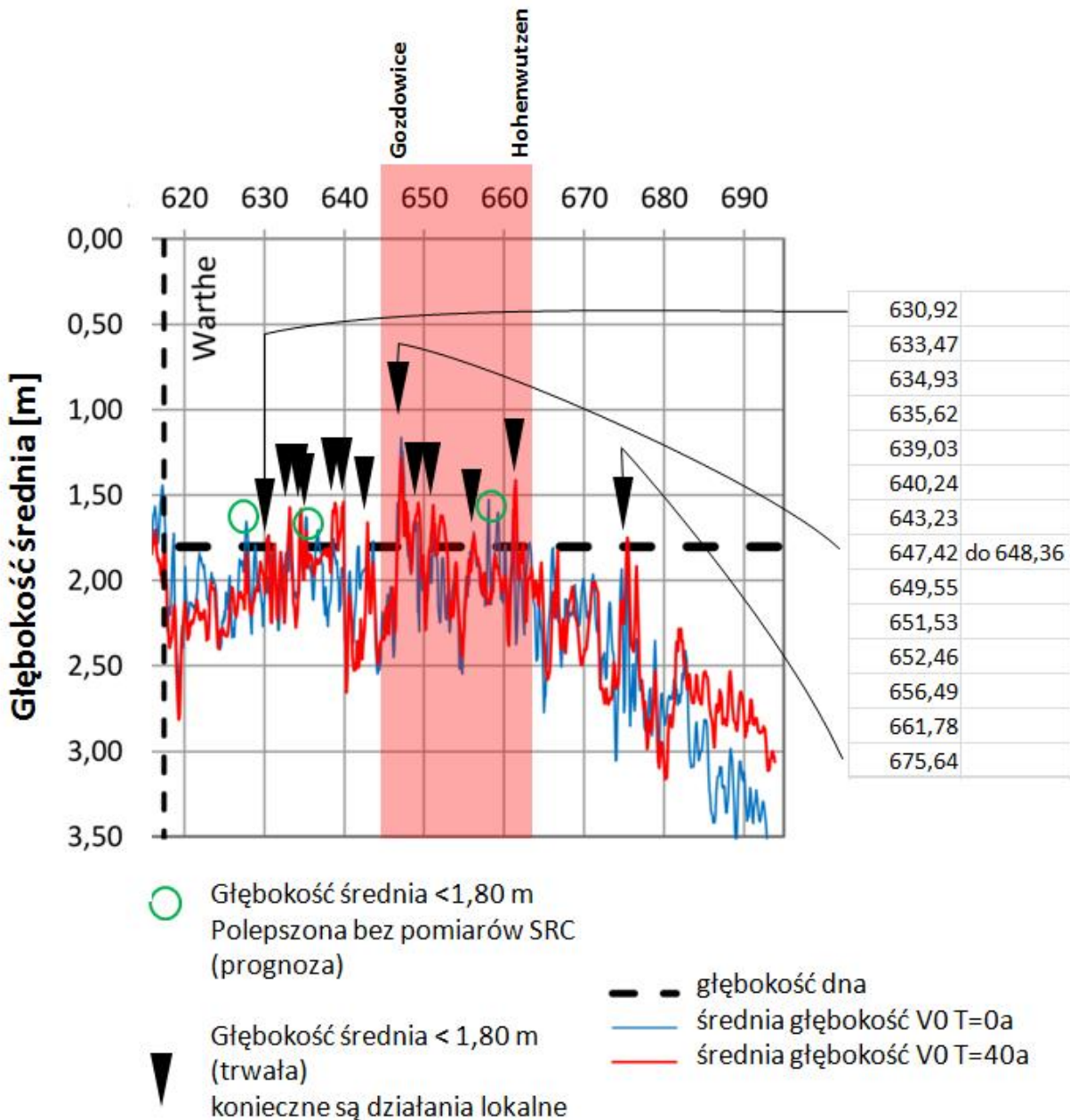
Transformujące się ławice piasku czy asymetryczne przekroje poprzeczne na łukach cieką „znikają” po uśrednieniu. Z tego powodu definicja miejsca limitującego głębokość w orzeczeniu KRC odnosi się zawsze do uśrednionego położenia dna. W tym aspekcie mówi się dalej: „Ilustracja 30 przedstawia przykładowo miejsca limitujące głębokość na odcinku Odry granicznej, określone na podstawie wyników z sondowań realizowanych periodycznie w celu zagwarantowania bezpieczeństwa żeglugi. Widać wyraźnie, że nie chodzi tutaj o pojedyncze stałe miejsca. Z powodu silnie wykształconej morfologicznej dynamiki dna Odry, wciąż inne obszary stają się miejscami limitującymi głębokość. Pomimo tego istnieją pojedyncze odcinki cząstkowe, na których albo powtarzalnie wciąż dochodzi do problemów głębokościowych albo, na których stan budowli regulacyjnych wymaga podjęcia większych przedsięwzięć naprawy bądź modyfikacji.” [1/, Załącznik s. 47]

O miejscach limitujących mówi się też: „Ze względu na zmniejszone prędkości przepływu odcinki te w porównaniu do odcinków sąsiednich wykazują z reguły tendencję albo do załadawiania albo - w wyniku dodatkowego dużego nanosu rumowiska - do tworzenia diun.“ [BAW Sprawozdanie okresowe KRC, Karlsruhe czerwiec 2012 w /15/]. Tabela 13 zestawia odcinki z utrzymującymi się miejscami limitującymi w dolnej Odrze (od ujścia Warty) i skrótowe informacje o przyczynach tego stanu ze strony polskiej i niemieckiej.

Tabela13: Miejsca limitowanych głębokości wody i ich przyczyny w ocenie polskiej i niemieckiej /15/

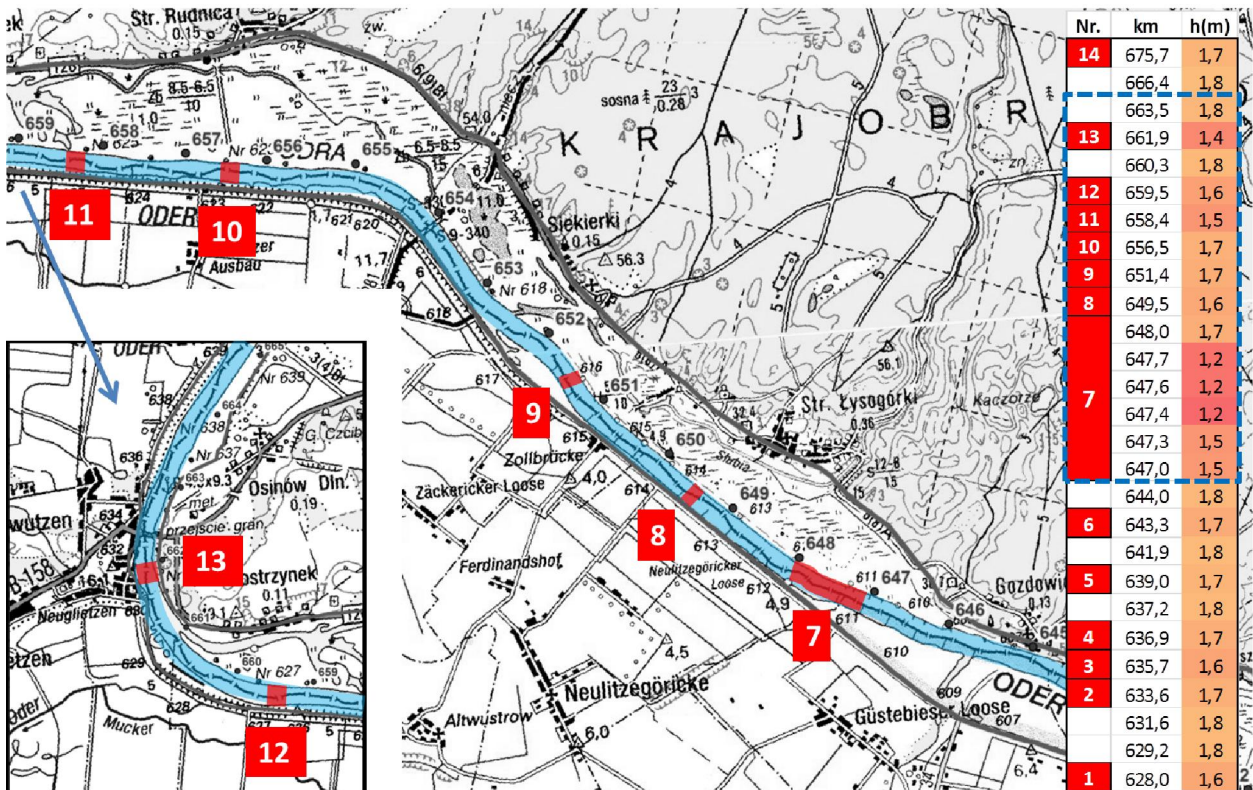
km Odry	Odcinek	Przyczyny podawane w Niemczech	Przyczyny podawane w Polsce
645,5 - 654	Gozdowice - Rudnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) niejednorodny stan techniczny ostróg</li> <li>b) wysokość ostróg mniejsza od projektowej</li> <li>c) obniżone międzywale ze względu na podwyższone koryto wody średniej</li> <li>d) długi prosty odcinek bez łuku</li> <li>e) transformujące się ławy piasku wynikające z niedostatecznego stopnia regulacji cieką i związanej z tym duże ilości rumowiska</li> <li>f) skok w odstępnie linii regulacyjnej z 188 na 165 m na 639,4 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stan techniczny ostróg (zniszczenia w 70 – 90%)</li> <li>• liczne i rozległe wydmy (ostroga poniżej SW) pomiędzy 646,8 i 648,2 km Odry</li> </ul>
654 - 663	Rudnica - Osinów Dolny	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tak samo ogólnie zły stan techniczny ostróg jak na Gozdowice – Rudnica. Patrz punkty powyżej a) – e)</li> <li>• załadawienie tam poprzecznych na prawym brzegu</li> <li>• częściowy remont (2005)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stan techniczny ostróg (zniszczenia w 70 – 90%)</li> <li>• zmieniający się w czasie rozkład nurtu</li> </ul>
656 - 659	Hohenwutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohenwutzen: podpiętrzenia wody, które silnie wpływają na transport rumowiska i transformację form depresyjnych dna</li> <li>• transformujące się diuny</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zniszczone budowle w 100% na odcinku od 656,5 do 658 km Odry</li> </ul>

Ilustracja 51 zawiera dane z orzeczenia KRC, służące lepszemu zlokalizowaniu miejsc limitujących i planowaniu lokalnych działań. Przedstawia ona przekroje podłużne pokazujące głębokość w obecnym stanie i w prognozie 40-letniej bez przeprowadzenia działań.



Ilustracja 51: Miejsca oddziałujące na głębokość i miejsca limitujące poniżej ujścia Warty przy przepływie miarodajnym  $Q_{P\bar{U}80/90}$  (zmod. z /1/, Ilustracje 6-9). Czarne trójkąty oznaczają miejsca limitowanych głębokości, dla których konieczne są lokalne działania.

Na ilustracji zaznaczono miejsca limitujące głębokość poniżej ujścia Warty. Miejsca limitujące występują przede wszystkim na odcinku pomiędzy Gozdowicami a Osinowem Dolnym / Hohenwutzen (647,4 i 661,8 każdorazowo z głębokością poniżej 1,5 m). Ilustracja 52 przedstawia ten rejon, tak samo jak KRC, na tle mapy identyfikującej lokalne głębokości. Dla lepszej przejrzystości w Tabeli 4 zestawiono jeszcze raz miejsca limitujące głębokość.



Ilustracja 52: Stale występujące miejsca głębokości limitujących (głębokość <math><1,80\text{ m}</math> przy \leq 1,80\text{ m}</math>) (zmod. z /1/, załącznik, ilustracja 40, źródło danych: /1/ ilustracja 6-77)

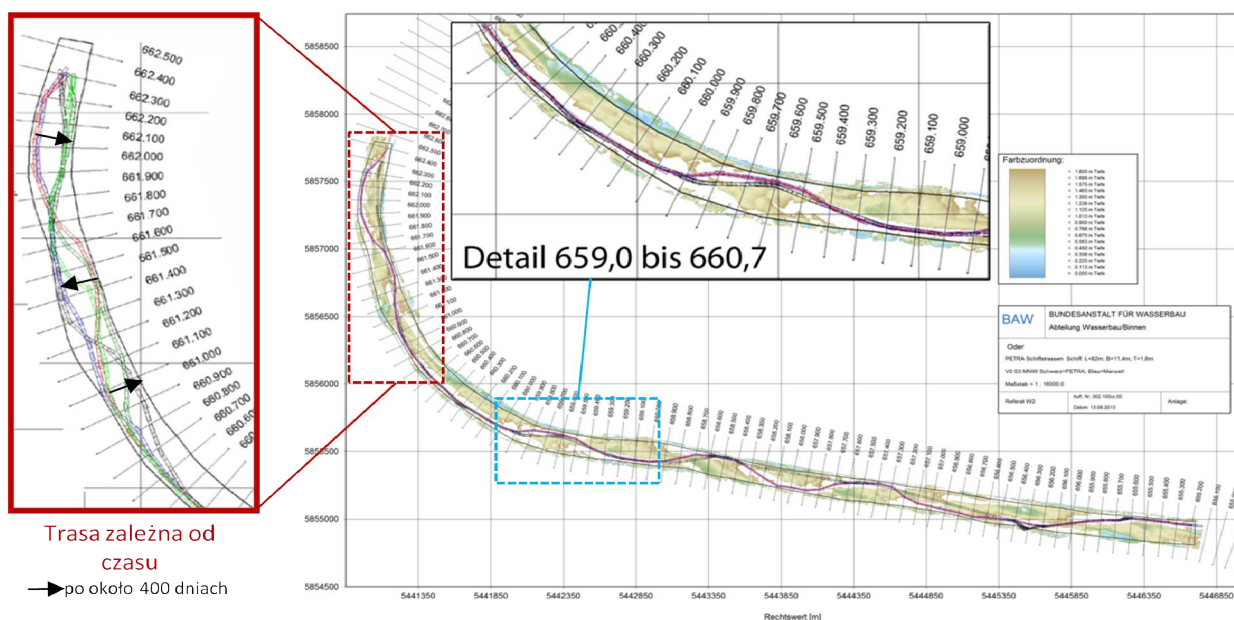
Tabela 14: Lokalizacja stale występujących miejsc głębokości limitujących

km Odry	Nr.	Położenie	Warunki hydrauliczne
675,7	14	poniżej Bielinka	rozszerzenie (równoległe przebiegające miejsce wydobywania żwiru)
661,9	13		
659,5	12		
658,4	11	odcinek z największą liczbą miejsc limitujących	
656,5	10	Gozdowice - Osinów Dolny	zob. Tabela 13i Ilustracja 52
651,4	9	i Hohenwutzen	
649,5	8		
647,0 - 648,0	7		
643,3	6	na południe od Starego Błeszyna (powyżej Gozdowice)	rozszerzenie koryta z szerokim międzywałem
639,0	5	na południe / powyżej Czelina	starorzecze po lewej stronie
635,7	4	poniżej Groß-Neuendorf	rozszerzenie koryta po lewej stronie
634,9	3	Groß-Neuendorf	rozszerzenie koryta po lewej stronie wpływ łuku
633,6	2	poniżej Kienitz / koniec międzywala Odry	na końcu łuku , po połączeniu ze starym lewym ramieniem
630,9	1	Sophiental powyżej Kienitz	prosty odcinek, koniec rozszerzenia koryta przez łęg starorzecza

## 7.2.2 Żegluga w miejscach limitownych bez występowania zjawisk lodowych

Dla żeglugi decydująca jest głębokość szlaku żeglownego. Jednakże uśredniona głębokość niewiele mówi o warunkach żeglownych w przypadku, gdy rozchodzi się o cieki z morfologicznie aktywnym dnem – takich jak Odra (zob. rozdział 6.1). Z tego powodu BAW w orzeczeniu KRC /1/ sprawdziła na podstawie badań na modelu fizycznym, czy pomimo diun i ławic piasku możliwa jest żegluga na krytycznym odcinku.

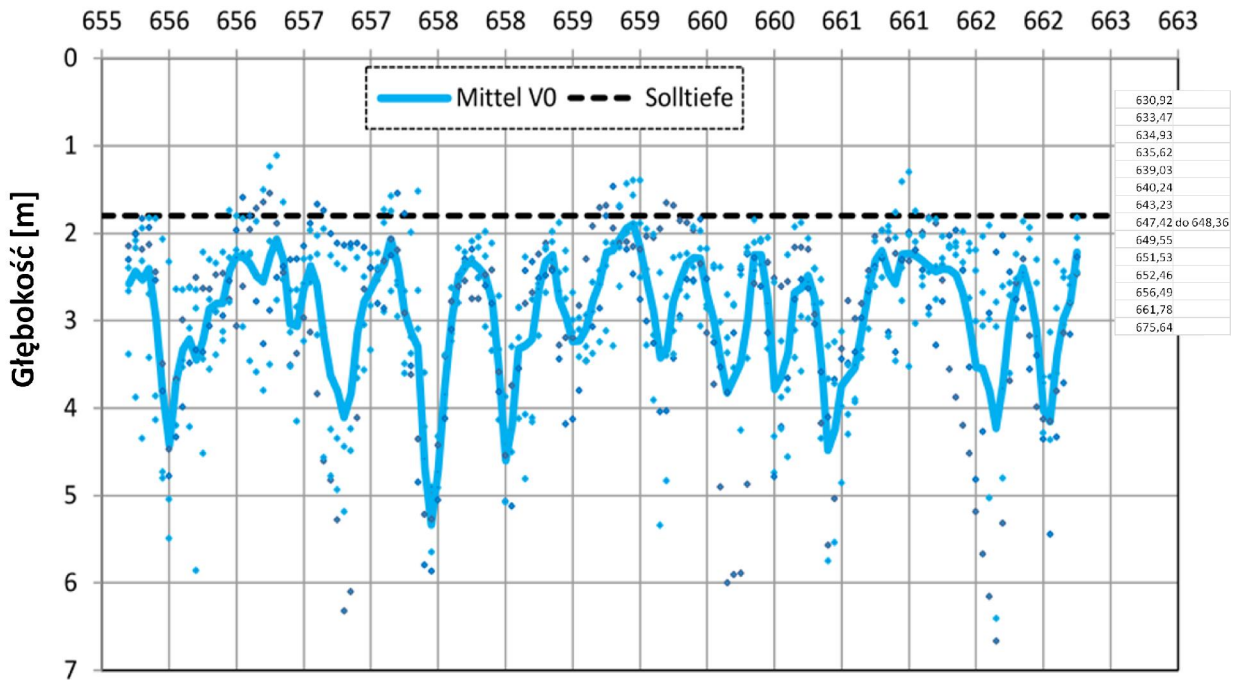
Ilustracja 53 obrazuje zoptymalizowane przez BAW trasy szlaku żeglownego dla krytycznego odcinka w rejonie Hohenwutzen. Widać na niej klarowny przebieg szlaku, prowadzącego obok zmieniających się form dennych koryta. Ponieważ ławice przemieszczają wolno ale bezustannie (por. rozdział 4.2), z biegiem czasu zmienia się też trasa szlaku żeglownego. Wychodząc z założenia, że transformacja ławic dokonuje się z prędkością 1,5 m/dobę /15/ przy średnim odstępnie między poszczególnymi ławicami 600 m, to oznacza to, że po ok. 400 dobach szlak przebiegałby symetrycznie względem osi cieku po stronie przeciwnej (w Ilustracja 53 po lewej stronie pokazane za pomocą strzałek).



Ilustracja 53: Obliczona trasa szlaku żeglownego odnośnie stanu obecnego przy wodzie niskiej i trasa szlaku żeglownego zależnego od danego okresu roku, ze względu na transformacje form dennych (1/ ilustracje 5-35 i 6-19)

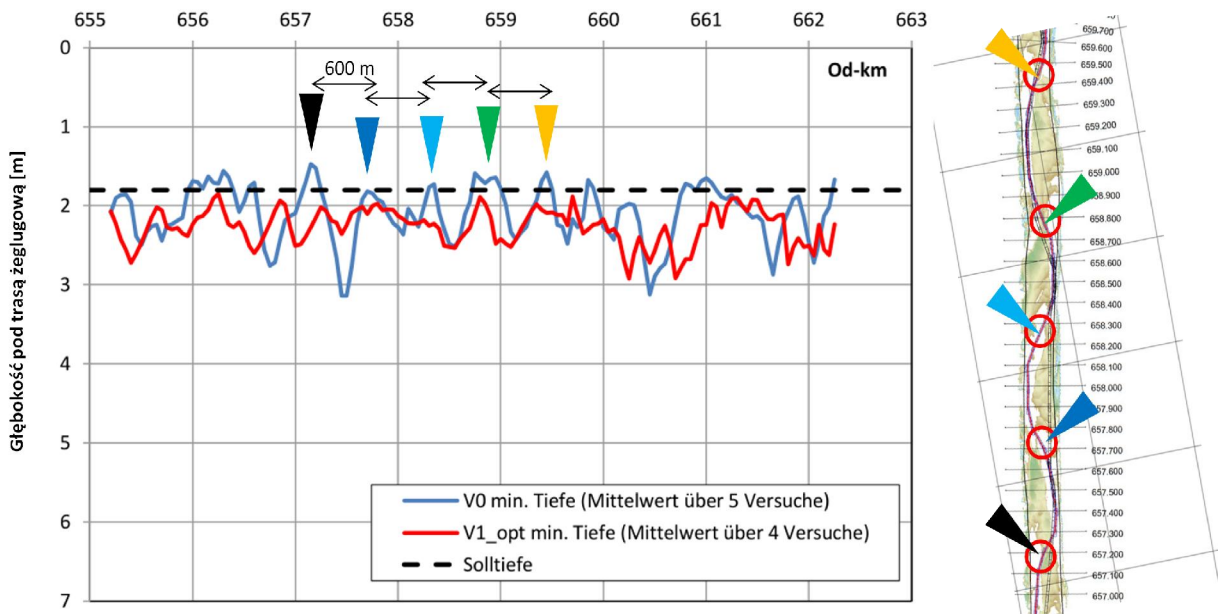
Odnosnie głębokości wzdłuż szlaku czytamy w orzeczeniu KRC: „W uśrednieniu jest tu wprawdzie osiągnięta głębokość 1,80 m w sposób ciągły. Jednakże wzdłuż biegu trasy w modelu występuje wiele obszarów, na których także w zoptymalizowanej trasie wymagającej wielu koniecznych manewrów statku średnia głębokość na torze przejazdu jest wyraźnie mniejsza niż 1,80 m.“ [1/, S. 104]

Ilustracja 54 porównuje uśrednione punktowe pomiary głębokości na trasie szlaku żeglownego z uśrednionymi wartościami stanu obecnego (V0). Przynajmniej w tym eksperymencie nie potwierdza się twierdzenie, że średnia głębokość tranzytowa szlaku żeglownego jest dużo niższa niż 1,80 m. Przeciwnie – średnie wartości 1,80 m zachowane są w sposób ciągły, chociaż lokalnie występują tu głębokości do minimum 1,05 m (tu km 656,8).



Ilustracja 54: Średnie i lokalne głębokości przy danej pozycji statku wzdłuż szlaku żeglownego (/1/ Ilustracje 6-20)

Uzupełnieniem do tego jest Ilustracja 55 przedstawiająca minimalne głębokości zmierzone w serii testów przy przepływie miarodajnym  $Q_{PÜ80}$  w rejonie danych pozycji statków. Lokalne wartości minimalne występują mniej więcej co 600 m i odpowiadają tym samym długości ławic piasku, wzgl. są położone w punktach zwrotnych, w których szlak w środkowej części nurtu przechodzi przez przesmyk pomiędzy transformującymi się ławicami.

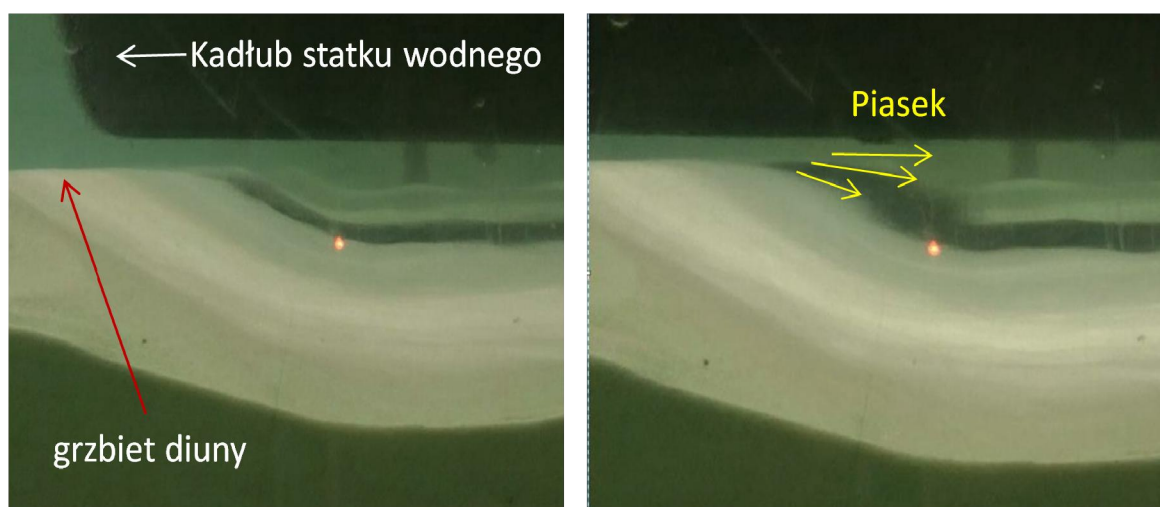


Ilustracja 55: Minimalne głębokości przy przepływie  $Q_{PÜ80}$  przy danej pozycji statku (zmod. z /1/, ilustracje 6-50) i oznaczone minimum wzgl. punkty zwrotne trasy żeglugowej (zmod. z /1/, Ilustracje 5-35)



Podsumowując stwierdzić należy, że szlaki żeglowne istnieją także wtedy, gdy lokalnie niekiedy głębokości tranzytowe są niższe niż 1,80 m przy przepływie miarodajnym ( $Q_{P\ddot{u}80}$ ).

Doświadczenia Uniwersytetu Technicznego Delft udowodniły, że punktowe głębokości limitowane w rejonie grzbietów diun nie są dla kadłubów statków zasadniczo żadną przeszkodą. Robijns (2014) zdołał w badaniach na modelu fizycznym wykazać, że lokalny wzrost prędkości w warstwie przydennej przy przepływie statków w górę rzeki prowadzi do erozji grzbietów diun (Ilustracja 56). Kadłuby statków płynąc pod prąd wytwarzają samoistnie pod kilem strumień, który chroni je przed osiadaniem na ławicy. Erozja grzbietów nasiliła się, przy zwiększonym ruchu statków.



Ilustracja 56: Rozkład prędkości pod kadłubem statku wodnego i wynikająca z tego erozja grzbietu diuny (z Robijns, 2014)

### 7.2.3 Podsumowanie miejsc limitujących głębokość i żeglowność szlaku

Przeprowadzone wyżej rozważania prowadzą raczej do wniosku, że występowanie na dolnej Odrze miejsc limitujących głębokość obecnie generuje konieczności działań regulacyjnych:

- Nie ma dowodów na to, że akcja lodołamania przy użyciu lodołamaczy w ogóle natrafia na utrudnienia ze względu na miejsca limitujące głębokość (rozdział 6.1). Gdyby tak jednak miało być rzeczywiście, alternatywne metody lodołamania są możliwością wykonania tego zadania bez ingerowania w Odrę działaniami regulacyjnymi (rozdział 7.1).
- Pomimo że na niektórych odcinkach średnia głębokość wody jest mniejsza niż 1,80 m, dają się wytyczyć trasy szlaków, które pozwalają na ruch statków w warunkach bez występowania zjawisk lodowych (rozdział 7.2.2). Lokalne głębokości minimalne wynikające z położenia grzbietów diun nie są dla kadłubów statków faktyczną przeszkodą (rozdział 7.2.3).
- Nawet wtedy gdy określone miejsca głębokości limitowanych miałyby być problemem dla żeglugi, to dotyczą one odcinków, których łączna długość wynosi zaledwie kilka

kilometrów (rozdział 7.2.1). Kompleksowa naprawa ostróg wzdłuż całej Odry granicznej z dodatkową rozbudową regulacyjną na poszczególnych odcinkach, jak to planuje koncepcja regulacji cieków KRC, nie jest wyżej nazwanym stanem uzasadniona (por. rozdział 6.4.1).

Bardziej sensowne wydaje się natomiast, inwestowanie w lepszy monitoring ławic i poprawę aktualizowania przebiegu szlaku, co dałoby się szybko wprowadzić w życie, a tym samym szybko przyniosło korzyści żeglugowe.

Autonomiczne (bezzałogowe) łodzie pomiarowe, wyposażone w echosondy i GPS, które w sposób ciągły monitorują dno w rejonie miejsc limitujących głębokość, należą w międzyczasie do technicznego wyposażenia niedużych akwenów wodnych (Ilustracja 57).



Ilustracja 57: Przykładowe modele autonomicznej łodzi pomiarowej z GPS i echolotem („Sonobot“ <http://www.geo-dv.de>)

Wyskalowanie tej technologii na potrzeby Odry jest technicznie możliwe. Dzięki temu analiza danych i dokonywanie obliczeń nowych przebiegów tras odbywałoby się praktycznie w czasie rzeczywistym.

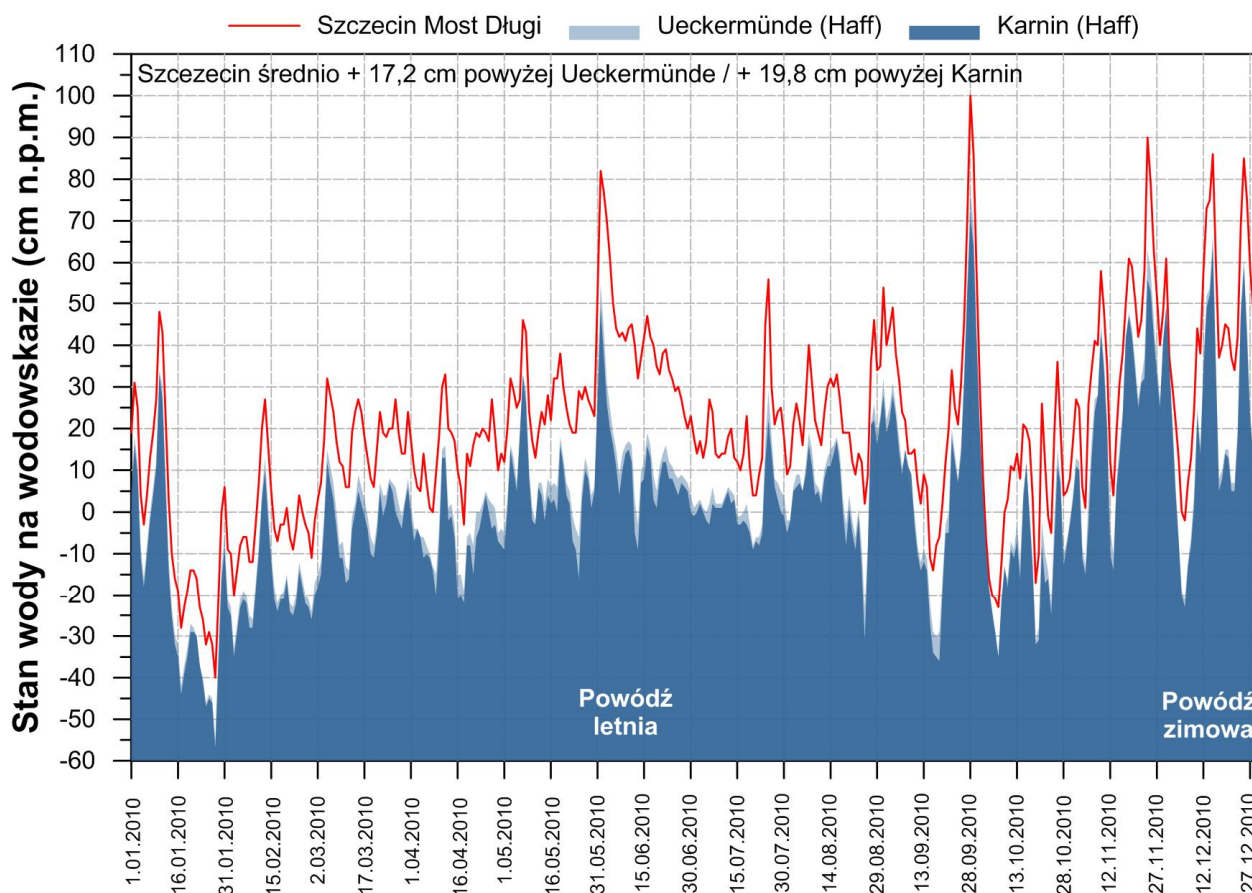
Poza tym systematyczny monitoring przyczyniłby się do lepszego prognozowania dynamiki form dennych koryta cieków. Także dla okresów występowania zjawisk lodowych możliwe byłoby wykorzystanie ostatnich danych zebranych przed powstaniem pokrywy lodowej.

Dane odnośnie aktualnego wykształcenia form dennych przyczyniłby się także do lepszego planowania bagrowania czy płukania. Bagrowanie jako działanie towarzyszące przewiduje także orzeczenie KRC. Można je stosować w celu przeciwdziałania akumulacji osadów w dole rzeki. (1/, s. 88).

### 7.3 Cofnięcie wałów w rejonie Świętej

Niebezpieczeństwo powodzi w rejonie Szczecina wywołuje przede wszystkim podwyższony stan Bałtyku, a co za tym idzie także Zalewu Szczecińskiego i jeziora Dąbie (zob. rozdział 3.3 do 3.5). Działania powyżej Szczecina, jak np. poldery w dolinie dolnej Odry, mają znikomy wpływ na stany wody w Szczecinie.

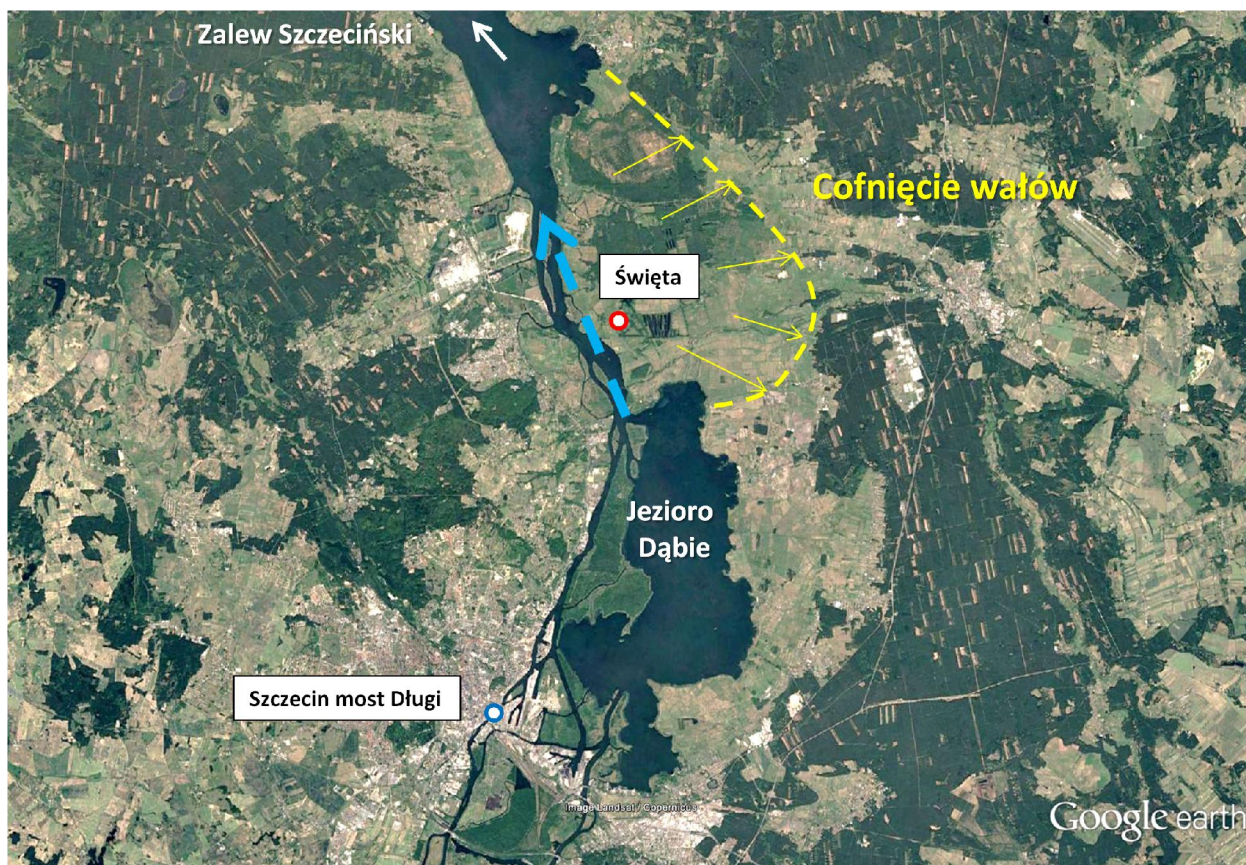
Stan wody w Szczecinie (Odra Zachodnia) leży średnio o ok.17 cm wyżej niż stan Zalewu Szczecińskiego (Ueckermünde), maksymalne różnice stanów mogą jednak dochodzić nawet do 39 cm, jak do miało miejsce podczas powodzi w czerwcu 2010 roku (Ilustracja 58).



Ilustracja 58: Stany wody w 2010 roku na Zalewie Szczecińskim i na Odrze Zachodniej w Szczecinie

Zmian położenia zwierciadła wody pomiędzy przedstawionymi wodowskazami nie da się określić bez numerycznego modelowania hydraulicznego. Jednakże da się wskazać, że najczęściej zaobserwowanych różnic w położeniu zwierciadła wody między Szczecinem a Zalewem Szczecińskim ustabilizowało się po przepływie przez rzekę Święta.

Poszerzenie przekroju poprzecznego w rejonie ciekę Święta jest zasadniczo możliwe, co obniżyłoby stany wody w Szczecinie, a tym samym zmniejszyło zagrożenie powodziowe w tym rejonie. Byłoby to możliwe przez przesunięcie wałów z kanałami melioracyjnymi chroniącymi pojedyncze obiekty (Ilustracja 59).



Ilustracja 59: Proponowane cofnięcie wałów w rejonie rzeki Świąta

Jednakże jedynie przy pomocy numerycznego modelu hydraulicznego 2D dałoby się zbadać, na ile działanie to wpłynęłoby na warunki hydrauliczne przepływu powodziowego.

## 8 Streszczenie

Odra jest jedną z ostatnich dużych rzek Europy Środkowej, która w swoim dolnym biegu płynie swobodnie i nie jest regulowana stopniami wodnymi. Dlatego zachowane są tutaj w dużej mierze ciągłość przepływu, transport materiałów stałych i swoboda migracji organizmów (ciągłość ekologiczna).

W porównaniu z rzekami, których bieg regulują stopnie wodne, zwraca uwagę fakt, że do tej pory na Odrze w dużej mierze udało się uniknąć wielu hydrologicznych i ekologicznych problemów, takich jak na przykład uciążliwe zarządzanie rumowiskiem z koniecznym i nieustającym jego uzupełnianiem, jak to ma miejsce na Renie czy Łabie, czy konieczność odtwarzania ciągłości ekologicznej dla takich gatunków ryb jak sieja miedwiańska *Coregonus maraena* czy jesiotr ostronosy *Acipenser oxyrinchus*. Tym samym Odra jest obszarem stałych lub okresowych siedlisk gatunków, które bez tych siedlisk najprawdopodobniej byłyby utracone.

Człowiek od stuleci ingerował w system rzeki Odry i czyni to także i obecnie. Jednakże w przeciwieństwie do rzek, gdzie zastosowano rozwiązania regulacyjne wykorzystujące stopnie wodne, działania regulacyjne na Odrze opierały się na korekcie biegu koryta i budowie ostróg, dzięki czemu rzeka zachowała swój swobodnie płynący charakter.

Z drugiej strony powodzie letnie w latach 1997 i 2010 uświadomiły wszystkim, że Odra wymaga koniecznie poprawy ochrony przeciwpowodziowej. Zarówno strona polska jak i niemiecka przedstawiły w tym zakresie odnośne koncepcje, które niniejsze sprawozdanie rekapitułuje i analizuje pod względem ich skuteczności.

W koncepcji strony polskiej Międzyodrza miałyby zostać rozbudowane do sterowanego polderu zalewowego – zostało to poddane analizie, w której wyniku ustalono: faktyczna powierzchnia użytkowa polderu i jego pojemność są znacznie mniejsze, niż to określają dane podane przez stronę polską we wniosku do Banku Światowego (PAD). Pojemność ta wynosi bowiem 54,27 mln m<sup>3</sup> przy 1,0 m głębokości wody retencyjnej czyli jedynie 5,4% wartości wymienionej w PAD.

Uwzględniając kompleksowe warunki hydrauliczne dolnej Odry zaproponowana przez stronę polską koncepcja nie poprawiłaby ochrony przeciwpowodziowej w porównaniu do tej, jaką zapewnia polder w swojej obecnej formie. Do tego wniosku prowadzą zwłaszcza dwa jednoznaczne w swojej wymowie argumenty. Po pierwsze polder straciłby swoją obecną funkcję jako naturalny polder przepływowy, która to funkcja przyczynia się do poszerzenia przekroju przepływu wody wysokiej, a tym samym do ustabilizowania stanów wody oraz do retencji kry. Po drugie położenie Międzyodrza oraz fakt, że fala powodziowa dopływa tu już bardzo spłaszczona i nie posiada wyraźnej kulminacji, oznacza, że skuteczność sterowanego polderu zalewowego byłaby wyjątkowo niska. Obliczenia przykładowe dla powodzi z lat 1997 i 2010 wykazują, że w warunkach idealnych udałoby się w ten sposób obniżyć położenie zwierciadła wody wezbrania o zaledwie parę centymetrów. Poza tym polder sterowany prowadzi do spiętrzenia napływającej z góry wody, przez co zmiany położenia zwierciadła wody następują szybciej, a tym samym wzrasta ryzyko powodziowe, gdyż skraca się okres przed nadejściem fali kulminacyjnej, a w miejscowościach położonych w górę rzeki stany wody rosną.

Opracowana przez BAW dla WSA Eberswalde niemiecka koncepcja regulacji cieku Odry Granicznej (KRC) przewiduje kompleksowy remont i przeprowadzaną na kolejnych odcinkach rozbudowę ostróg na całej długości Odry granicznej. Myślą przewodnią tej koncepcji jest hipoteza, że zapewnienie minimalnej głębokości średniej jest niezbędne, aby zapewnić skuteczność akcji lodołamania przy użyciu lodołamaczy. Tym samym koncepcja KRC orientuje się wyłącznie sytuacją wezbrań zatorowych, które charakteryzuje jednakże przepływ średni wysoki. Zdaniem orzeczenia KRC rozbudowa ostróg skutkuje pogłębieniem się średniego położenia dna, przy jednoczesnym zachowaniu stanu wód w jak największym stopniu po to, aby zapewnić więcej wody żeglownej. Przeprowadzone przez BAW badania były bardzo szczegółowe i prowadziły na obszary jeszcze naukowo nie zbadane. W tym kontekście wymienić należy dynamikę transportu materiałów stałych trójwymiarowo wykształconego dna koryta cieku – zwłaszcza pod lodem. Jednakże pod uwagę brana była zawsze wyłącznie środkowa część dna. Ostatecznie orzeczenie KRC nie podaje danych odnośnie struktury form dennych, a zwłaszcza odnośnie wysokości diun i ławic piasku, w szczególności przy jednoczesnym występowaniu zjawisk lodowych. Zasadniczym kryterium dla pracy lodołamaczy jest jednak właśnie wysokość grzbietów diun, a nie średnia głębokość toru żeglownego.

W związku z tym duży jest oczywiście także stopień niepewności analitycznej w obliczeniach zmian dna Odry w prognozie 40-letniej. Na ten fakt wskazuje BAW od razu na samym początku orzeczenia KRC. Prognozowane zwiększenie głębokości tranzytowej, które ma być wynikiem rozbudowy ostróg, wypada stosunkowo nisko i mieści się w wartościach niepewności analitycznej obliczeń modelowych. Skuteczność planowanych w KRC działań nie da się wobec tego jednoznacznie udowodnić. Jednakże jednocześnie w takim samym stopniu nie da się wykluczyć negatywnego oddziaływania hydrauliczno-morfologicznego, jak na przykład zdynamizowanie przekształcania się form dennych koryta czy wznoszenie się, czyli powiększenie się, diun lub ławic piasku.

Podsumowując należy stwierdzić, że obie koncepcje budzą wątpliwości, czy proponowane w nich działania faktycznie poprawią ochronę przeciwpowodziową na Odrze. Ponadto brak w nich całościowego podejścia, jak to jest bezspornie konieczne w przypadku złożonych sieci rzecznych. Konieczny jest tutaj cały wachlarz działań, poczynając od poprawy naturalnej retencji w zlewni poprzez zastosowanie alternatywnych lodołamaczy i metod łamania lodu (konwencjonalne łodzie z mniejszym zanurzeniem lub koparki Amphibex) a w końcu do zrównoważonej gospodarki rumowiskiem i zrównoważonego rozwoju wybrzeża Bałtyku.

W obliczu wyzwań, jakie niosą ze sobą zmiany klimatu i podnoszenie się poziomu Bałtyku, konieczna jest dla Odry kompleksowa i wielonarodowa strategia ochrony przeciwpowodziowej. Problemy, które stoją u podstaw koncepcji regulacji cieku Odry Granicznej czy rozbudowy Międzyodrza na sterowany polder zalewowy, są tylko niewielką częścią o wiele bardziej złożonej problematyki.

**SPIS LITERATURY**

- Amsler, M.L., Blettler, M.C.M., Ezcurra de Drago, I. (2009): Influence of hydraulic conditions over dunes on the distribution of the benthic macroinvertebrates in a large sand bed river. In: *Water Resources Research* 2009. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008WR007537/abstract>.
- Kögel, M., Das, A., Marszelewski, W., Carstensen, D., Lindenschmidt, K.-E. (2017): Machbarkeitsstudie zur Vorhersage von Eisstau auf der Oder. *Wasserwirtschaft* 5 (2017).
- Beltaos, S. (1995): *River Ice Jams*. Water Resources Publications, LLC.
- Bervaes, J. (1990): "IJsgang oorzaak van overstromingen". *Land & Water* 10 (December 1990).
- Buchholz, W. (2007): Warunki Hydrologyczne Estuarium Odry. Hydrological conditions of the Odra estuary. Conference papers: Regional problems of water management and hydrotechnics. Hg. v. Conference papers: Regional problems of water management and hydrotechnics.
- Chorley, R.I., Kennedy, B.A. (1971): *Physical geography - a system approach*. London: Prentice Hall Int. Inc.
- DWA (2014): *Flutpolder*. DWA-Themen T1/2014. Hennef.
- Fischer, H., Wilczek, S., Brunke, M., Kloep, F. (2006): Mikrobieller Stoffumsatz in der Flusssohle. Beitrag in *Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 5: Stoffdynamik und Habitatstruktur in der Elbe*, Hrsg. Pusch, M. und Fischer H., Weißensee-Verlag Berlin, 2006.
- Gramberg, Keil (1938): Die Verbesserung der Vorflut in der unteren Oder (II. Hydraulische Unterlagen, Ermittlung der Wassermengen, der Gefälle und der Querschnitte für die einzelnen Vorfluter). Notwendigkeit und Planung der Vorflutverbesserung, ihre Durchführung und ihre Erfolge. In: *Die Bautechnik* 16 (35), S. 448-453.
- Hentschel, B., Höger, P. (2014): Physikalische Modelluntersuchungen zu einer Eisstauproblematik an der Oder. Fachbeitrag 37. *Dresdner Wasserbaukolloquium 2014*.
- Hüsener, T.; Hentschel, B.; Ewe, A. (2010): Morphologische Entwicklung der Grenzoder. HENRY - Hydraulic Engineering Repository. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*.
- Kieseritzky, I. R. (1938): Die Verbesserung der Vorflut in der unteren Oder. Notwendigkeit und Planung der Vorflutverbesserung, ihre Durchführung und ihre Erfolge. In: *Die Bautechnik* 16 (23/24), S. 285-328.
- Kleinwächter, M., Schröder, U., Rödiger, S., Hentschel, B., Anlauf, A. (2017): Alternative Buhnenformen in der Elbe -hydraulische und ökologische Wirkungen. *Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 11*.
- Lindenschmidt, K.-E., Sydor, M., Carson, R., Harrison, R. (2012): Ice Jam Modelling of the Lower Red River. *Journal of Water Resource and Protection*, 2012 (4), S. 1-11.
- Michel, B. (1971): *Winter regime of rivers and lakes*. CRREL Monograph III-IBa. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover.
- Oder-Auen-Atlas (2012): Herausgeber WWF-Deutschland und WWF-Aueninstitut (aktualisierte Auflage, online: [http://atlas.odra.pl/tab\\_3.html](http://atlas.odra.pl/tab_3.html))
- Ostmann, Keil (1939): Die Verbesserung der Vorflut in der unteren Oder (III. Bauwerke). Notwendigkeit und Planung der Vorflutverbesserung, ihre Durchführung und ihre Erfolge. In: *Die Bautechnik* 17 (13), S. 180-195.
- Rakowitz, G., Berger, B., Schludermann, E., Tritthart, M., Habersack, H., Keckeis, H. (2013): Deep pools of the Danube River: ecological function or turbulent sink? In: *Hydrobiologia* 2013.
- Raudkivi A.J. (1976): *Loose Boundary Hydraulics*. Oxford: Pergamon Press.

Reineck, H.E., Sing, I.B. (1975): *Depositional Sedimentary Environments. With Reference to Terrigenous Clastics*. Springer Study Edition. Berlin-Heidelberg-New York: Springer.

Robijns, T. (2014): *Flow beneath inland navigation vessels*. Master Thesis TU Delft.

Steiner, K. (2007): *Untersuchung zur Periodizität des Wanderverhaltens von Dünen in einer Oderstrecke mit einem hydraulischen Modell*. Diplomarbeit am Institut für Wasserbau und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TH), angefertigt an der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, November 2007.

Sukhodolov, A., Fedele J.J., Rhoads, B.L. (2006): *Structure of flow over alluvial bedforms: an experiment on linking field and laboratory methods*. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 2006.

Sukhodolova, T. (2008): *Studies of turbulent flow in vegetated river reaches with implications for transport and mixing processes*. Dissertation.

Wagner, H. (1969): *Die Bestimmung der an der Wasseroberfläche angreifenden Windschubspannungen*. Schriftenreihe Wasser- und Grundbau. In: *Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin* (Heft 24).

Kreft, A., Woś, K. (2007): *Wechselbeziehungen zwischen der Transport- und der Hochwasserschutzfunktion des Grenzabschnittes und des Unteren Abschnittes der Oder*". III International Scientific Conference. „Inland Shipping 2007”. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 16(6B), 2007.