

Wirksamkeit des geplanten Flutpolders Międzyodrze und der Stromregelungskonzeption für den Hochwasserschutz der Unteren Oder

05.03.2018

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



Förderung: Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück



Projektpartner:



Auftragnehmer: gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung
An der Pastoa 13
03042 Cottbus
Tel.: 0355 / 4838 90
Fax.: 0355 / 4838 920
Email: info@gerstgraser.de
Internet: www.gerstgraser.de

Projektleiter: Dr. Christoph Gerstgraser

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

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG	5
2	PLANUNGSGRUNDLAGEN UND BERICHTE	6
3	HYDROLOGIE UND HOCHWASSER DER UNTEREN ODER.....	8
3.1	Einteilung des Stromgebiets.....	8
3.2	Hochwasser an der Oder	9
3.2.1	Eishochwasser an der Oder	10
3.3	Hydrologische Verhältnisse an der Unteren Oder.....	12
3.4	Unterwasserstände am Beispiel der Sommerhochwasser 1997 und 2010	16
3.5	Hydraulische Verhältnisse der Unteren Oder	18
3.5.1	Windstau in der Unteren Oder.....	18
3.5.2	Hydraulische Folgen der Eisbildung	19
4	MORPHOLOGIE DER ODER	20
4.1	Sohlenentwicklung	20
4.1.1	Hochwassereinfluss auf die Sohlenentwicklung	21
4.2	Dünen und Transportkörper	22
4.2.1	Dünen als Lebensräume für Organismen	23
4.3	Wirkweise von Buhnen.....	24
4.3.1	Wechselwirkungen zwischen Buhnen und Dünen	25
4.3.2	Buhnen als Lebensräume für Organismen	27
5	HOCHWASSERSCHUTZKONZEPT MIĘDZYODRZE-POLDER	28
5.1	Allgemeines zu Flutpoldern	28
5.1.1	Begriffe und Definitionen	28
5.1.2	Flutpolder-Betriebsweisen	29
5.1.3	Bemessung von Flutpoldern.....	30
5.2	Flächen- und Poldergröße Międzyodrze.....	31
5.3	Abschätzung des Windstaus im Dammschen See	33
5.4	Funktionen und Wirkung eines Międzyodrze-Flutpolders	35
5.5	Beispielrechnung zur Wirksamkeit der Scheitelkappung	36
5.6	Wirksamkeit des Flutpolders bei Kappung ab 1.600 m ³ /s	43
5.7	Auswirkungen eines Flutpolder-Ausbaus.....	45
5.7.1	Wirkung von Trenndeichen bei Eishochwasser	47
5.7.2	Schlüsselstelle Marienhofer Wehr	48
5.7.3	Schlüsselstellen an Brücken in der Unteren Oder	51

5.8	Einschätzung des Hochwasserschutzkonzepts Międzyodrze-Ausbau	53
6	STROMREGELUNGSKONZEPTION DES WSA EBERSWALDE	54
6.1	Veranlassung für die Stromregelungskonzeption	54
6.2	Definition der mittleren Wassertiefe.....	55
6.3	Methodische Vorgehensweise der BAW	56
6.4	Vorzugsvariante der BAW	58
6.4.1	Wirkung der Vorzugsvariante SRK-V5	59
6.4.2	Hochwasserwirkung der Vorzugsvariante SRK-V5.....	60
6.5	Einschätzung der Stromregelungskonzeption (SRK).....	63
7	ALTERNATIVE HOCHWASSERSCHUTZ-ANSÄTZE	65
7.1	Alternativen zum Eisaufruch mit Eisbrechern	65
7.2	Umgang und Probleme mit lokalen Flachstellen.....	66
7.2.1	Identifikation von Flachstellen	66
7.2.2	Schiffspassage an Flachstellen unter eisfreien Bedingungen.....	69
7.2.3	Zusammenfassung zu Flachstellen und Schiffbarkeit.....	71
7.3	Deichrückverlegung bei Święta	72
8	ZUSAMMENFASSUNG	74
	LITERATURVERZEICHNIS	76
	ERRATA	78

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abschnitt 1	oberhalb der Warthemündung bis Oder-km 540
Abschnitt 2	unterhalb der Warthemündung bis zum Dammschen See (km 694)
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DNR	Deutscher Naturschutzring e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EMW ₂₀₁₀	Entwurfsmittelwasserstand auf Grundlage der Jahresreihe 1981 - 2010 für einen Abfluss von 300 m ³ /s oberhalb der Warthe und 500 m ³ /s unterhalb
NQ, MQ, HQ	Niedrigwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserabfluss
NW, MW, HW	Niedrigwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserstand
IKSO	Internationale Kommission zum Schutz der Oder gegen Verunreinigung
mod.	modifizierte Abbildung
PAD	Project Appraisal Document im Odra-Vistula Flood Management Project der International Bank for Reconstruction and Development (kurz: Weltbank) /2/
Q _{PÜ80}	Bemessungsabfluss bei 80% Überschreitungswahrscheinlichkeit (entspricht 160 m ³ /s im Abschnitt 1)
Q _{PÜ90}	Bemessungsabfluss bei 90% Überschreitungswahrscheinlichkeit (entspricht 250 m ³ /s im Abschnitt 2)
SRK	Stromregelungskonzeption der BAW im Auftrag des WSA Eberswalde /1/
SRK-V0	Ausgangsvariante der SRK ohne Maßnahmen
SRK-V5	Vorzugsvariante der SRK mit Instandsetzung / Ausbau der Bühnen
SUP	Strategische Umweltprüfung
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSP	Wasserspiegel
WWF	World Wide Fund For Nature
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional
1D-FTM	Eindimensionales Feststofftransportmodell der BAW

1 Veranlassung

Am 27.04.2015 wurde zwischen Deutschland und Polen ein Hochwasserschutzabkommen zur Grenzoder unterzeichnet, das „eine neue Stromregelungskonzeption für den Einsatz von Eisbrechern“ vorsieht. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamts Eberswalde erstellte die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) das Gutachten „Aktualisierung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder“. Demnach soll für den Eisbrechereinsatz an der Grenzoder eine mittlere Wassertiefe von 1,80 Meter an 90% des Jahres unterhalb und 80% des Jahres oberhalb der Warthemündung hergestellt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine Homogenisierung und Instandsetzung der vorhandenen Buhnen (Streichlinienabstand, Buhnenhöhe und Buhnenkopfeigung) vorgesehen.

Neben der Stromregelungskonzeption wird von polnischer Seite vorgesehen, Międzyodrze (Zwischenoderland) von Widuchowa bis kurz vor Szczecin zum Flutpolder für den Hochwasserschutz auszubauen. Der Flutpolder soll die Hochwassersituation für Szczecin verbessern. Er ist, genau wie auch die Umsetzung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder auf der polnischen Seite, Teil des von der Weltbank mitfinanzierten „Odra-Vistula Flood Management Project“.

Sowohl von der Umsetzung der Stromregelungskonzeption als auch vom Polderausbau des Zwischenoderlandes gehen erhebliche Umweltauswirkungen aus, die im Rahmen einer SUP geprüft werden sollen. Dazu wurde im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Verbändeprojekts „Ökologischer Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Oder mit Schwerpunkt auf die Modellregion Unteres Odertal“ die Erstellung eines alternativen Hochwasserschutzgutachtens initiiert.

Für ein alternatives Hochwasserschutzgutachten sind fachgutachterliche Stellungnahmen zur Stromregelungskonzeption und zum Polderausbau des Zwischenoderlandes erforderlich. Für beide Komponenten sollen die zugrundeliegenden Annahmen und Bemessungsgrundlagen geprüft und die geplanten Maßnahmen hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit und der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen begutachtet werden. Dazu werden auch die fachlichen Grundlagen zu Flussmorphologie und -hydraulik sowie der Wirkweise von Buhnen und Poldern aufgearbeitet und verständlich gemacht.

2 Planungsgrundlagen und Berichte

- /1/ BAW (2014): Aktualisierung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder. Gutachten im Auftrag der WSA Eberswalde, Karlsruhe, Mai 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/ IKSO (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/ Pegeldata des polnischen staatlichen Forschungsinstitut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW-PIB) - Źródłem pochodzenia danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy. <http://www.imgw.pl/>
- /12/ DGM-Daten des Zentralen Zentrum für geodätische und kartographische Dokumentation für Międzyodrze. <http://www.codgik.gov.pl/index.php/darmowe-dane/nmt-100.html>
- /13/ pegelonline Daten der Pegel Koserow (Ostsee), Ueckermünde, Mescherin, Gartz, Friedrichsthal, Schwedt Oderbrücke, Stützkow, Hohensaaten-Finow, Kienitz und Kietz (Stundenwerte Wasserstand 15.11.2017 bis 15.12.2017).
- /14/ DWD-Daten der Stationen Angermünde und Ueckermünde als Stundenwerte (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/ Thesenpapier für eine spätere rechtliche Regelung zur gemeinsamen Verbesserung der Situation an den Wasserstraßen im deutsch/polnischen Grenzgebiet (Hochwasserschutz, Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse). Unterzeichnet am 29.10. und 24.11.2008, auf deutscher Seite von Bernd Törkel, Leiter der Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt im Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; auf polnischer Seite von Andrzej Sadurski, Präsident des nationalen Vorstandes für Wasserwirtschaft. Überarbeitet als Vorbereitung für ein Regierungsabkommen am 18. Dezember 2013 in Szczecin. Online unter https://www.wsv.de/wsd-o/betrieb_unterhaltung/Grenzoder_und_Hohensaaten-Friedrichsthaler_Wasserstrass-Thesenpapier_24.11.pdf)

3 Hydrologie und Hochwasser der Unteren Oder

3.1 Einteilung des Stromgebiets

Die Oder hat eine Länge von 854 km und ein Einzugsgebiet von etwa 119.000 km². Mit 89% liegt der Großteil davon in der Republik Polen. Die restlichen Flächenanteile liegen zu 6% in der Tschechischen Republik und zu 5% in der Bundesrepublik Deutschland (Abbildung 1).



Abbildung 1: Einzugsgebiet und Abschnitte der Oder (mod. nach wikipedia)

Die Oder wird nach ihrer Geomorphologie und dem Abflussverhalten in Obere, Mittlere und Untere Oder eingeteilt (Tabelle 1). Der etwa 160 km lange Abschnitt der Mittleren / Unteren Oder als Landesgrenze zwischen Polen und Deutschland wird als „Grenzoder“ bezeichnet /1/.

Tabelle 1: Abschnitte der Oder und ihre Eigenschaften

Oder-abschnitt	Fluss-km von bis	Mittleres Gefälle	Beschreibung
Obere Oder	0 - 180,0	0,3‰	von der Mündung der Ostrava bis zur Mündung der Glatzer Neiße (Nysa Klodza) /4/
Mittlere Oder	180,0 - 620,0	0,28‰	von der Mündung der Glatzer Neiße bis zur Mündung der Warthe (Warta) /4/
Untere Oder	620,0 - 707,0	0,17 - 0,03‰	von der Mündung der Warthe bis zum Stettiner Haff (Zalew Szczecinski) /4/
Grenzoder	542,4 - 704,1,0	0,27 - 0,03‰	von der Mündung der Lausitzer Neiße (Nyza Luzycka) bis Abzweig der Westoder bei Widuchowa (Fiddichenau) /1/, Grenze zwischen Polen und Deutschland

3.2 Hochwasser an der Oder

Hochwasser an der Oder sind nicht außergewöhnlich und treten regional fast alle Jahre auf. Die Wahrscheinlichkeit ist aber gering, dass der gesamte Oderlauf von katastrophalen Hochwassern betroffen ist. Gründe hierfür sind die abschnittsweise unterschiedlichen hydrologischen Voraussetzungen für ein Hochwasser (Tabelle 2).

Tabelle 2: Hauptursachen für Hochwasser der Oder (mod. nach /3/)

Oderabschnitt	Ursachen Winter	Ursachen Sommer
Obere Oder, Oberläufe linksseitiger Zuflüsse	Schneesmelze	Konvektive Niederschläge, Zyklonale Starkniederschläge
Mittlere Oder, Warthe	Schneesmelze	Zyklonale Starkniederschläge
Untere Oder	Eishochwasser	Zyklonale Starkniederschläge, Zuflüsse der Warthe, Rückstau vom Stettiner Haff

Extreme Hochwasserereignisse entstehen im Frühjahr durch eine Überlagerung der Schneeschmelze mit Starkniederschlägen. Im Sommer dagegen werden sie allein durch großräumige Starkniederschläge ausgelöst und verlaufen in kurzen und steilen Hochwasserwellen. Eishochwasser im Winter sind eine Besonderheit der Unteren bis Mittleren Oder.

Für die Hochwasser der Unteren Oder spielen auch die Zuflüsse aus der Warthe eine wichtige Rolle, die fast 40% zum Gesamtabfluss beitragen. Zuletzt muss auch der Wasserstand im Stettiner Haff bzw. im Dammschen See berücksichtigt werden, der durch Rückstau für den Ablauf der Hochwasserwelle eine wichtige Randbedingung darstellt.

Rückblickend traten die größten Hochwasser im 20. Jahrhundert überwiegend im Sommer auf. Dazu zählt insbesondere das Sommer-Hochwasser 1997, das hinsichtlich Scheitelwert, Scheiteldauer und verursachtem Schaden das extremste Ereignis an der Oder darstellt. Dagegen finden sich am Pegel Eisenhüttenstadt nur drei Eishochwasser unter den 11 größten Hochwassern im 20. Jahrhundert (Abbildung 2). Das größte entstand im Winter 1947 oberhalb von Reitwein durch Eisstandsbildung, die durch Sprengungen zusätzlich ungünstig beeinflusst wurde /6/.

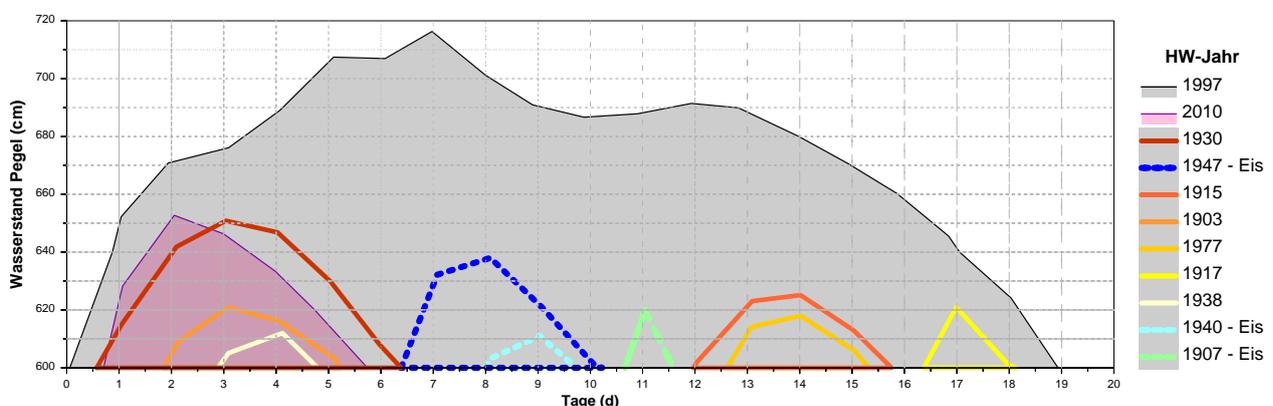


Abbildung 2: Wasserstandsganglinien von HW-Spitzen über 600 cm am Pegel Eisenhüttenstadt / Fürstenberg ab 1901 (Daten aus /9/)

3.2.1 Eishochwasser an der Oder

Eishochwasser sind gemäß DIN 4049-3 (1994) Hochwasser, die durch das Zusammentreffen von hohen Durchflüssen und Durchflussbehinderungen durch Eis (z.B. Eisversetzung) entstehen.

In den Wintermonaten liegt die Oder häufig im Bereich kalter Festlandluft und ist daher von Eisbildung betroffen. Im Mündungsbereich der Oder (Stettiner Haff / Dammscher See) vollzieht sich die Eisbildung ähnlich wie in stehenden Gewässern, d. h. die Wasseroberfläche friert an den Ufern beginnend zu. Bei längeren starken Frostperioden bilden sich aber nicht nur Randeis, sondern auch Grundeis und Schwebeis (Abbildung 3), welches aufschwimmt und als Treibeis solange abgeführt wird, bis es an einem Hindernis zum Stehen kommt (Abbildung 4). Die aufgestauten Treibeisschollen frieren aneinander und bilden eine geschlossene Eisdecke, den Eisstand (Abbildung 5). Wenn ankommende Eisschollen auf einen Eisstand auflaufen, werden sie darunter und darüber geschoben. Es kommt zum Eisdickenwachstum und einer Querschnittseinengung, die als Eisversatz (oder auch Eisversetzung) bezeichnet wird. Durch die Stauwirkung steigt beim Eisversatz der Wasserspiegel stark an.

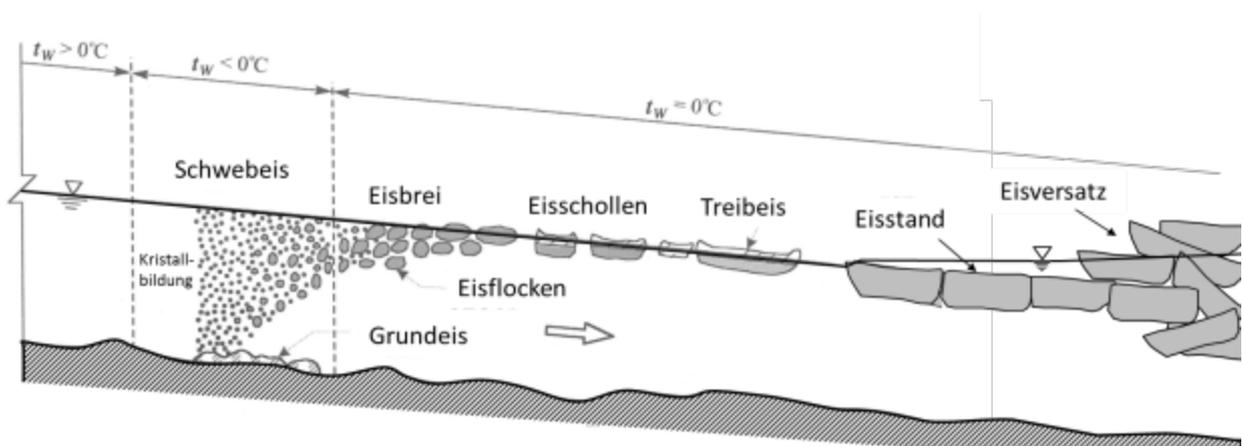


Abbildung 3: Genese von Eis in einem Fließgewässer, das sich unter 0°C abkühlt (mod. nach Michel, 1971 in /7/)



Abbildung 4: Treibeis und Randeis auf Oder 2011 (Foto: Schieberle in /6/)



Abbildung 5: Eisstand in Frankfurt / Oder 2009 (Foto: Schuh in /6/)

An Oberer und Mittlerer Oder bilden meist Wehre den Ansatzpunkt für den Eisversatz. An der Unteren Oder ist es besonders die Eisdecke im Dammschen See, der früher als die Oder zufriert. Hinzu kommt das generell ungünstige Eisabfuhrvermögen an der Unteren Oder, das aus dem geringen Gefälle und den geringen Fließgeschwindigkeiten resultiert.

An der Oder besteht das größte Schadenspotential, wenn sich Eis- und Frühjahrshochwasser überlagern, wie z.B. beim bisher größten Eishochwasser Mitte März 1947. Der Mittelgebirgsraum des Odereinzugsgebietes verfügte dabei noch über hohe Schneerücklagen, die durch Tauwetter mit Temperaturanstieg und zusätzlichen Niederschlägen zum Abfluss kamen /3/. Auf- und Rückstau, Überflutungen und mechanische Schädigung der Deiche durch Eisanprall sind durch die ohnehin schon hohen Wasserstände dann besonders verheerend.

Historisch gesehen treten Eishochwasser zwischen Ende Dezember und Anfang April ein. Dabei drang die Eisstandsbildung in den letzten 100 Jahren statistisch etwa alle 2 Jahre vom Stettiner Haff bis zur Mündung der Lausitzer Neiße vor /3/. Insbesondere durch die Verschmutzung und die Erwärmung des Flusses mit Ab- und Kühlwässern hat sich seit Anfang der 70er Jahre die Dauer von Eisstandsperioden reduziert (LUA, 1994 in /3/). Durch Modernisierungen des Kohlekraftwerks Dolna Odra oberhalb von Gryfino ist die eingeleitete Wärmeenergie in die Oder in den letzten Jahren jedoch reduziert worden (Kreft und Wós, 2007). Der begünstigende Einfluss auf die Verzögerung der Eisstandsbildung oder die Verkürzung der Eisstandsperioden wurde damit ebenfalls verringert.

Beim Abklingen der Frostperiode bilden sich unterhalb von Einleitungen und an den Bühnenköpfen eisfreie Rinnen, die den Beginn der selbstständigen Eisstandsauflösung einleiten. Das Eis bricht in Schollen auseinander und treibt als Eisgang ab. Ein rechtzeitiger Eisaufruch im Stettiner Haff und Dammschen See ist dabei wichtig, um ein freies Abschwimmen des Eises zu ermöglichen und Eisversatz zu vermeiden (LUA, 1994 in /3/).

3.3 Hydrologische Verhältnisse an der Unteren Oder

Das Zuflussgebiet der Unteren Oder liegt zum größten Teil im Flachland, wo sommerliche Niederschläge in der Regel keine ausgeprägten Hochwasserwellen verursachen.

Grundsätzlich treten die aus dem oberen Stromlauf kommenden Hochwasserwellen mit abgeflachter Form in die Untere Oder ein und flachen sich hier noch weiter ab. Dieser Zusammenhang wird im direkten Vergleich der Ganglinien an Meldepegeln zwischen Miedonia und Gartz (Abbildung 7) deutlich, die in Abbildung 7 für das Hochwasser 1997 und in Abbildung 8 für das Hochwasser 2010 überlagert dargestellt sind.



Abbildung 6: Übersicht der überregionalen Meldepegel an der Oder (aus /9/)

Beim Hochwasser 1997 kam es oberhalb von Frankfurt (Oder) zu mehreren Deichbrüchen, die als Schwankungen am Pegel Eisenhüttenstadt und als Delle in der Ganglinie am Pegel Frankfurt (Oder) erkennbar sind /8/. Summarisch bewirkten die Deichbrüche und Überflutung innerhalb von 2 Tagen ein zwischenzeitliches Absinken der Wasserstände um ca. 75 cm am Pegel Frankfurt / Oder und etwa 25 cm am Pegel Hohensaaten-Finow, bevor die Wasserstände bis zum Eintreffen des Hauptscheitels am 27. Juli wieder anstiegen (Abbildung 7).

Einen großen Anteil daran hatte die Ziltendorfer Niederung mit ca. 55 km² Überflutungsfläche. Sie wurde daher auch als Flutungspolder im Hochwasserrisikomanagement / Regionale Maßnahmenplanung des Landes Brandenburg für die Oder in der Maßnahmenliste „Oder O1 - Oder Ratzdorf bis Hohensaaten“ aufgenommen. Darin wird ein Retentionspotential der Ziltendorfer Niederung von bis zu 130 Mio m³ angegeben (Maßnahmen-Code O1_0001_00005 siehe http://www.lfu.brandenburg.de/media_fast/4055/O1_Massnahmenliste.pdf). Allerdings handelt es sich hierbei - im Gegensatz zu Międzyodrze - um ein zusätzliches Poldervolumen außerhalb der Deiche und damit außerhalb des Hochwasser-Fließquerschnitts der Oder (siehe Kapitel 5.2). Die hydraulischen Randbedingungen lassen sich ebenfalls nicht ohne weiteres auf Międzyodrze übertragen.

Die Wasserstände an der Unteren Oder sind vom Wasserstand in der Ostsee und den dortigen atmosphärischen Einflüssen (Wind und Luftdruck) abhängig. Sie definieren die untere Randbedingung für die Wasserspiegellage und die Ausdehnung des Rückstaubereiches, der sich bis etwa 100 km oberhalb von Szczecin ausdehnen kann. Pegeldata der Ostsee, des Stettiner Haffs und der Oder bis Kietz (Abbildung 6) sind exemplarisch für den Zeitraum November - Dezember 2017 in Abbildung 9 zusammengestellt.

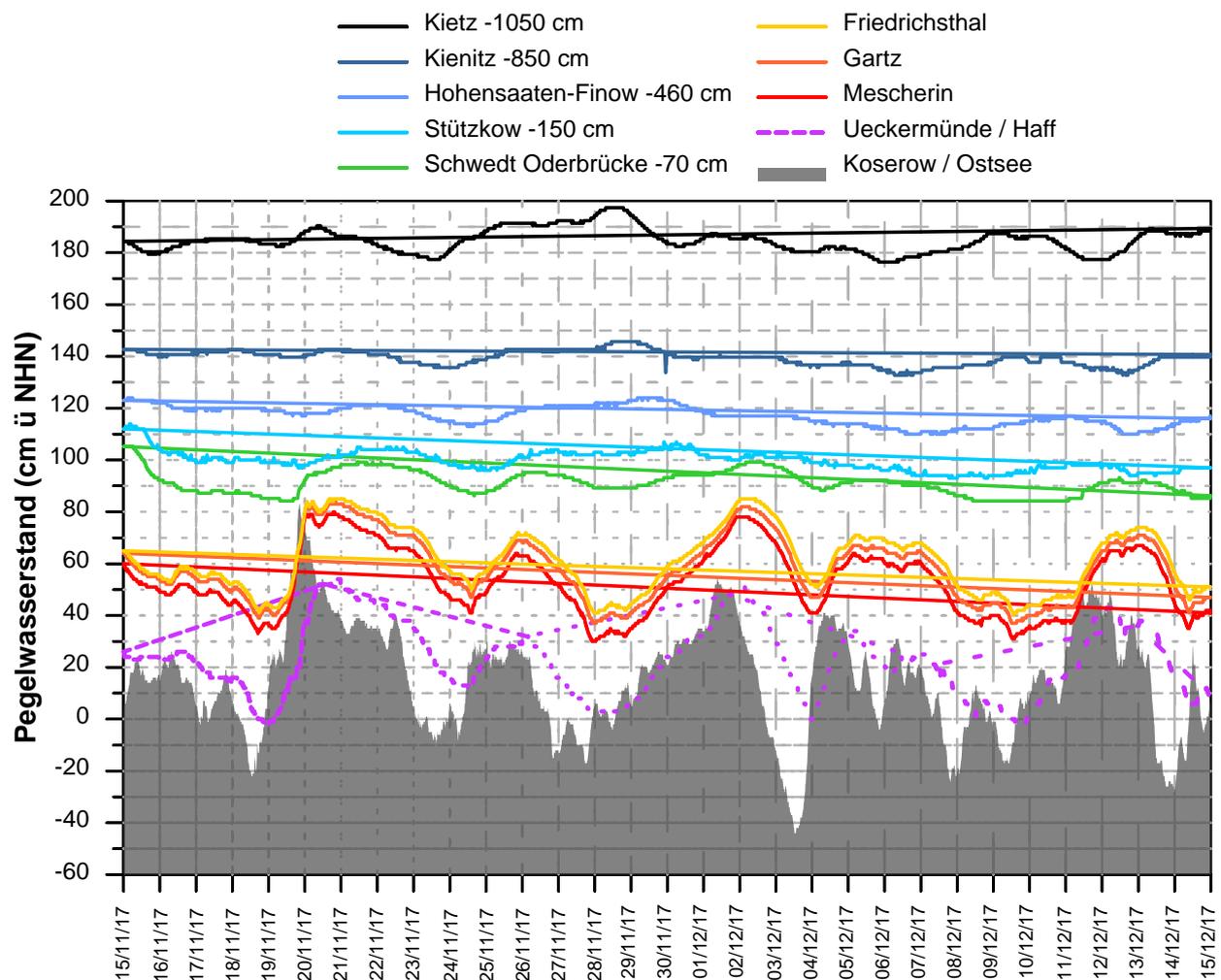


Abbildung 9: Pegelvergleich Ostsee, Stettiner Haff und Untere Oder bei MQ um 750 m³/s (für die Übersichtlichkeit sind einige Pegel um einen konstanten Betrag abgemindert (Daten: /13/))

Aus Abbildung 9 geht hervor:

- Der Wasserstand in der Ostsee weist die größte Dynamik auf. Sowohl der Gezeiteneinfluss als auch Wind und Luftdruck werden in der Ganglinie wiedergegeben.
- Im Stettiner Haff verläuft der Wasserstand gegenüber der Ostsee gedämpft und um einige Stunden verzögert. Das Stettiner Haff wirkt damit als Puffer für hohe Frequenzen in den Wasserstandsschwankungen der Ostsee.
- In der Unteren Oder sind die Wasserstände bis einschließlich Friedrichsthal vom Wasserstand im Haff überprägt. Die Wasserstandsschwankung beträgt im dargestellten Zeitraum etwa ± 30 cm, etwa genauso viel wie im Stettiner Haff selbst. Hier ist also keine weitere Dämpfung mehr vorhanden.
- Bis Schwedt ist der Einfluss des Haffwasserstandes noch in der Pegelganglinie zu erkennen. Die Wasserstandsschwankung ist mit ± 10 cm aber wesentlich geringer und die Dynamik damit weiter abgedämpft.
- Oberhalb von Schwedt ist die Dämpfung noch ausgeprägter und die Ganglinie verläuft zunehmend abflussabhängig. Der Einfluss des Haffwasserstandes ist nur noch bei größeren Änderungen im Wasserstand identifizierbar, z.B. beim Absinken zwischen dem 20. und 24.11.2017.

Zusammenfassend handelt es sich bei der Unteren Oder um ein komplexes hydraulisches System, das rückstaugeprägt ist und sowohl von den niederfrequenten Wasserstandsänderungen der Ostsee als auch vom Abfluss und der hydraulischen Rauheit der Oder abhängt.

3.4 Unterwasserstände am Beispiel der Sommerhochwasser 1997 und 2010

Nachfolgend wird anhand von Pegeldaten untersucht, wie der Wasserstand der Ostsee und das Hochwasser zusammenhängen. In Abbildung 10 erfolgt dazu zunächst ein direkter Vergleich der beiden Sommerhochwasser 1997 und 2010 am Pegel Ueckermünde im Stettiner Haff.

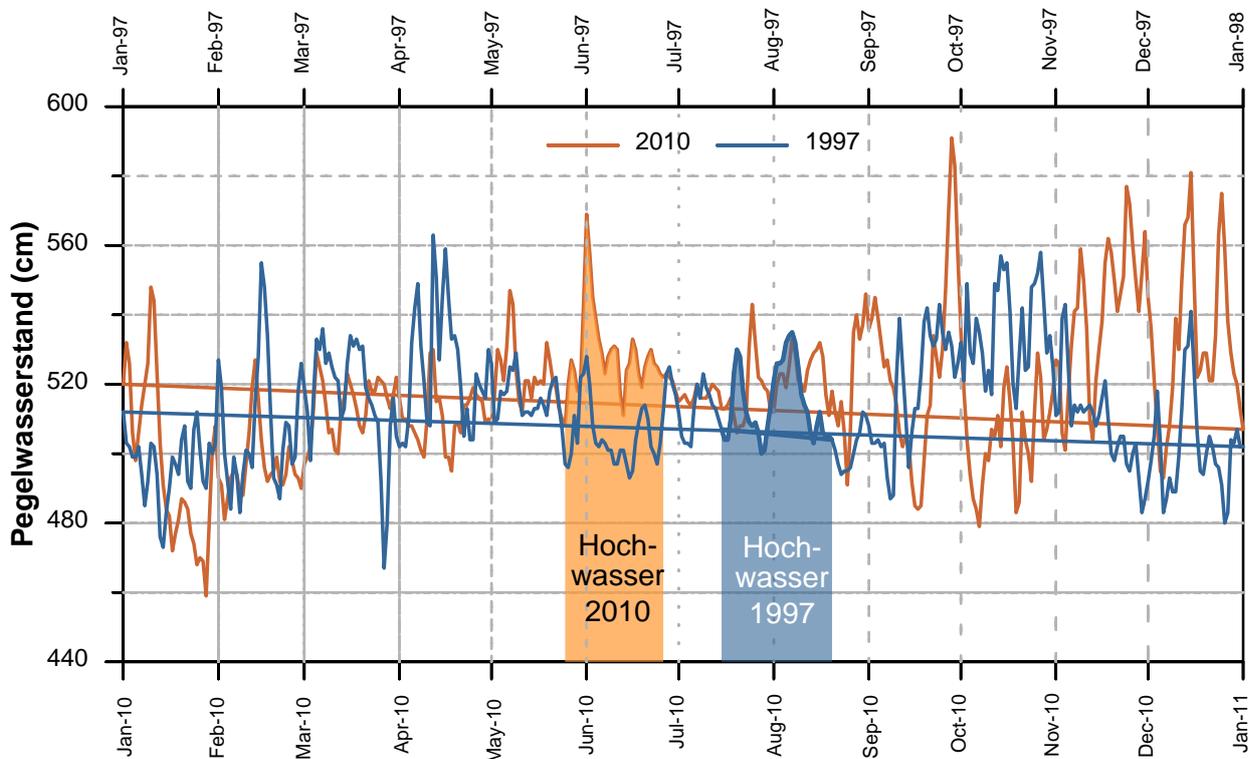


Abbildung 10: Jahresgang 1997 und 2010 am Pegel Ueckermünde (Stettiner Haff). Farbflächen markieren jeweils den Zeitraum des Hochwassers (Daten: /10/)

Der direkte Vergleich zeigt, dass die Wasserstände im Stettiner Haff während des Oder-Hochwassers 2010 ungünstiger waren als während des Oder-Hochwassers 1997. Einerseits lag der mittlere Wasserstand etwas höher, andererseits kam es zu einer markanten Spitze Anfang Juni 2010. Trotz der günstigeren Randbedingung im Haff fiel das Oder-Hochwasser 1997 im gesamten Einzugsgebiet verheerender aus als 2010.

Deutlich wird auch, dass die Haffwasserstände zur Zeit der Hochwasser nicht außergewöhnlich waren und keinesfalls einer Jährlichkeit entsprechen, wie sie den Hochwasserpegeln der Oder zugeordnet wurde (z.B. in Stützkow einem HQ_{60} , d. h. einer Jährlichkeit von 60 Jahren).

Für genauere Betrachtungen sind Wasserstandsganglinien mehrerer polnischer und deutscher Pegel sowie Abflussganglinien für Hohensaaten-Finow und Widuchowa für das Jahr 2010 einschließlich des Hochwassers in Abbildung 11 dargestellt.

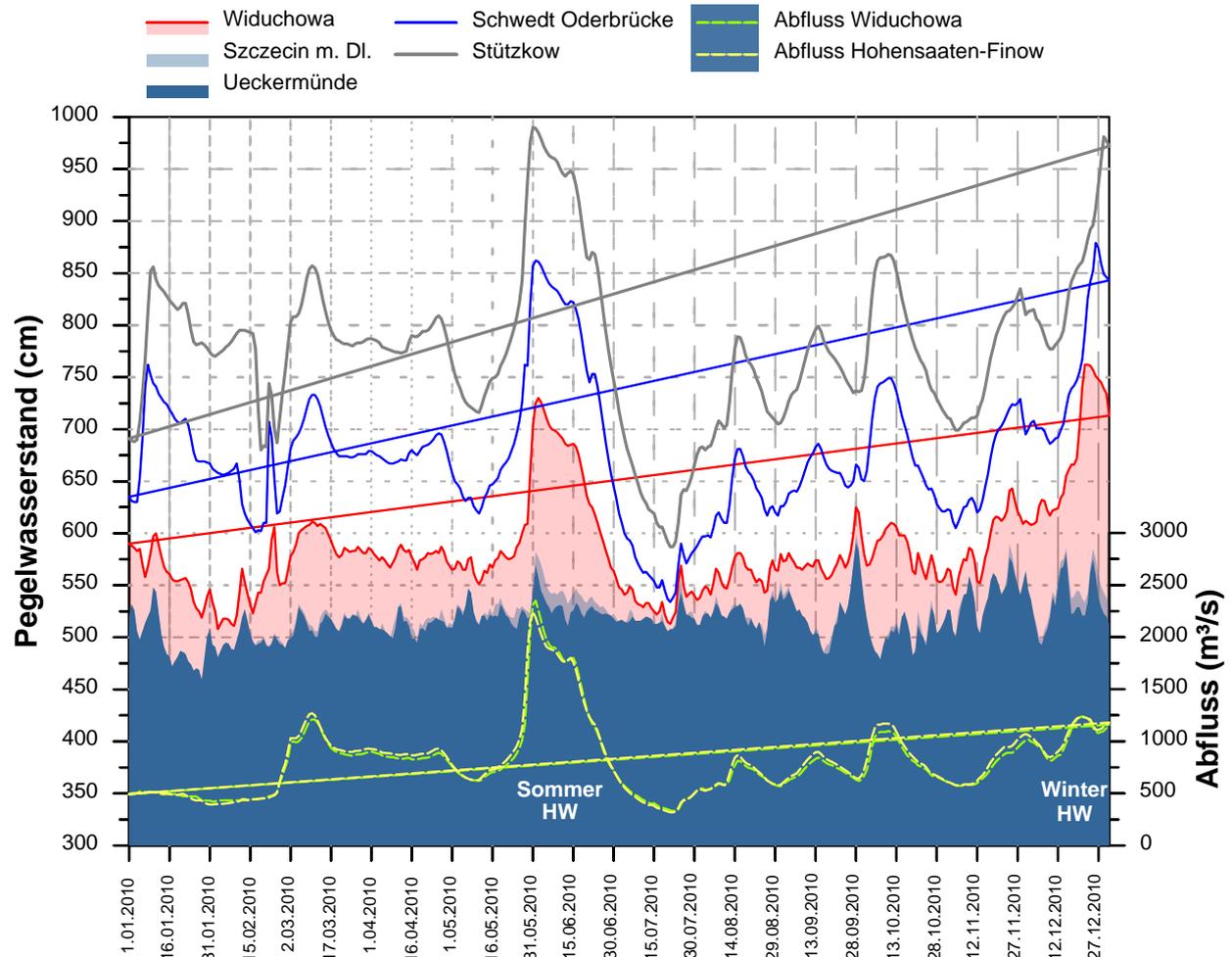


Abbildung 11: Wasserstands- und Abflussganglinien im Jahr 2010 an Pegeln der Unteren Oder und in Ueckermünde / Stettiner Haff (Datenquellen: /10/ /11/)

Was die gegenseitige Beeinflussung von Haffwasserstand und Oderwasserständen angeht, sind folgende unterschiedliche Situationen aufschlussreich:

- Die Ganglinien aller betrachteten Pegel sind beim Hochwasser 2010 abflussgeprägt. Der Hochwasserscheitel wirkte sich bei Erreichen des Dammschen Sees und des Stettiner Haffs auf den Wasserstand aus, der dort am 01.06. um etwa 50 cm anstieg.
- Am 28.09.2010 bei zurückgehendem Abfluss kam es zu einer markanten Spitze beim Wasserstand in Haff. Diese Spitze wirkte sich deutlich auf die Wasserstände der Oder aus und ist in den Ganglinien Widuchowa, Schwedt und auch Stützkow zu erkennen.
- Zwischen 22.-24.02.2010 kam es zu einer kurzen Spitze in den Wasserständen der Pegel Widuchowa bis Stützkow, die wahrscheinlich mit Eisstau nach einem bereits erfolgten Eisauflauf zusammenhängen (Eisauflauf begann im Dammschen See am 02.02.2010, siehe /6/, S. 152). Der Haffwasserstand (Ueckermünde) blieb davon jedoch unbeeinflusst.

3.5 Hydraulische Verhältnisse der Unteren Oder

Die Oder im Bereich oberhalb Szczecin ist rückstaugeprägt. Der rückstaugeprägte Bereich erstreckt sich bis etwa 100 km oberhalb von Szczecin, was mit der Angabe in Buchholz (2007) übereinstimmt. Hierin wird Gozdowice als maximale Entfernung der Stauwurzel genannt und dabei darauf verwiesen, dass es unterhalb von Gozdowice aufgrund der Staukurve keine einfachen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen mehr gibt (die sog. Schlüsselkurven).

Hydraulisch ist die Staukurve bei den geringen Gefälleverhältnissen der Unteren Oder eine Kurve, die in zwei Asymptoten übergeht. Eine Asymptote ist die Wasserspiegellage des freifließenden Abschnittes oberhalb. Die zweite Asymptote ist praktisch horizontal und entspricht dem Ruhewasserstand im Dammschen See (Abbildung 12).

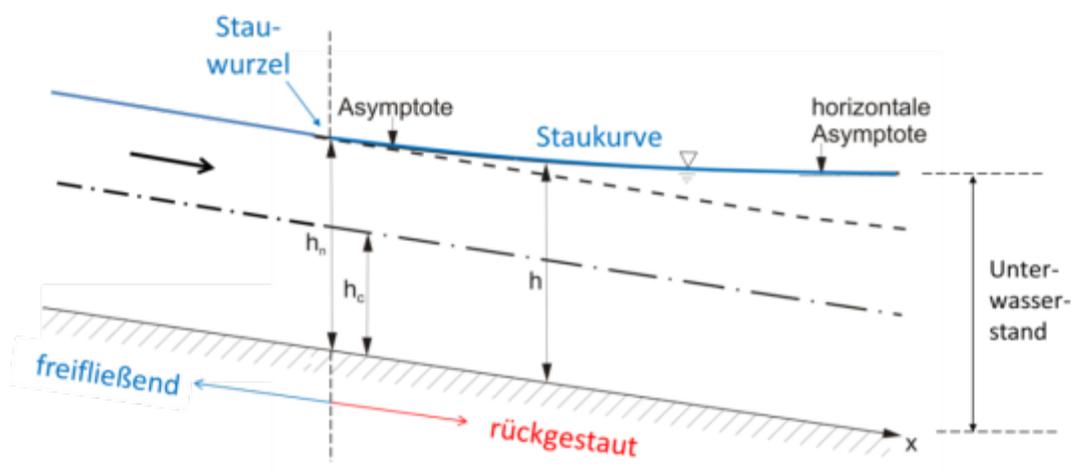


Abbildung 12: Wasserspiegellage (Typ „M1“) bei rückgestautem Abfluss und mildem Gefälle

3.5.1 Windstau in der Unteren Oder

Der zusätzliche Einfluss des Windes auf die Wasseroberfläche der Oder ist eher gering. Nur bei einer ausreichend langen Einwirkungslänge (Überstreichlänge) kann sich ein größerer Windstau bzw. Windsunk bilden (Abbildung 13). Dies ist nur möglich, wenn die Windrichtung parallel zur Oder verläuft, d. h. Windstau bei Nordwinden und Windsunk bei Südwinden. Zusätzlich muss die Winddauer ausreichend lang sein.

Bei Windstau und Windsunk wird auch das vertikale Fließgeschwindigkeitsprofil modifiziert. Bei hohen Windgeschwindigkeiten und starkem Windstau kann es z.B. zu einer oberflächennahen Rückströmung entgegen der Fließrichtung der Oder kommen.

Das Zusammentreffen eines Hochwasserereignisses mit lang andauernden starken Winden aus nördlichen Richtungen ist aber grundsätzlich von geringer Wahrscheinlichkeit (Buchholz, 2007).

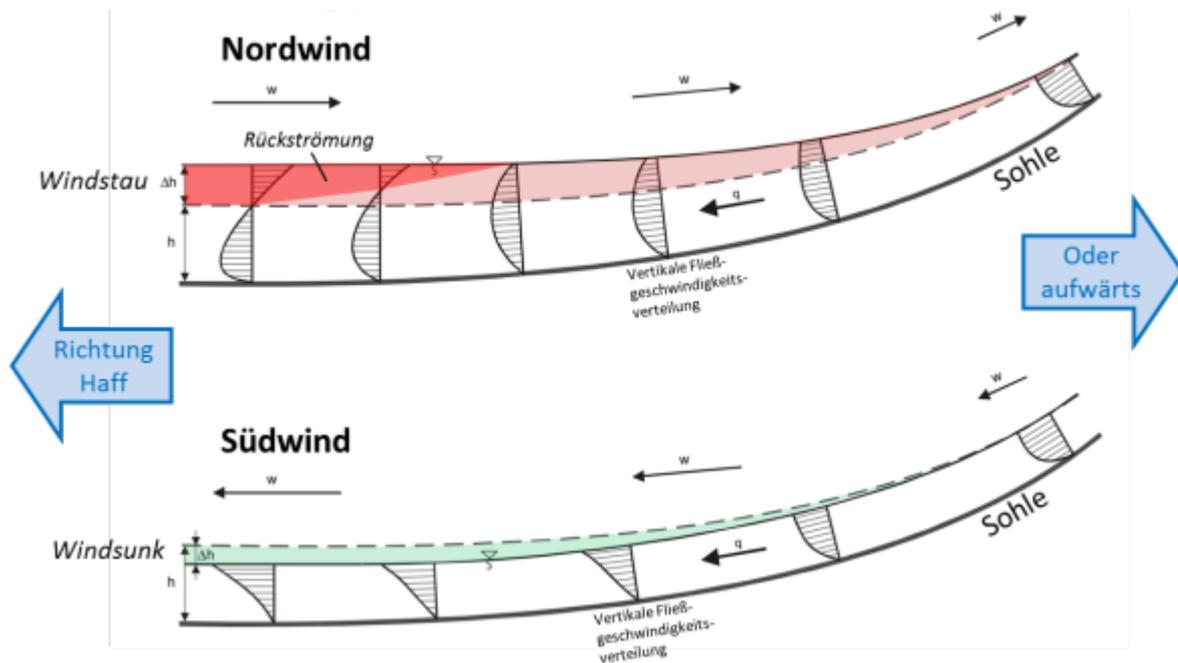


Abbildung 13: Windwirkung auf die Wasserspiegellage der Unteren Oder (mod. aus Buchholz, 2007)

3.5.2 Hydraulische Folgen der Eisbildung

Die Bildung einer Eisdecke an der Wasseroberfläche hat einen erheblichen Einfluss auf die Strömung. Sie stellt eine zusätzliche Berandung dar, die Reibung auf das Wasser ausübt. Durch die insgesamt höheren Verluste sinkt die mittlere Geschwindigkeit und der Wasserspiegel steigt an. In der Grenzoder beträgt der eisbedingte Anstieg des Wasserspiegels abhängig von der Wasserführung in der Regel zwischen 0,80 m und 1,50 m (LUA, 1994 in /3/, S. 32). Besonders unter Druckabflussverhältnissen kann es lokal auch zu Sohlenerosion kommen, wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt.

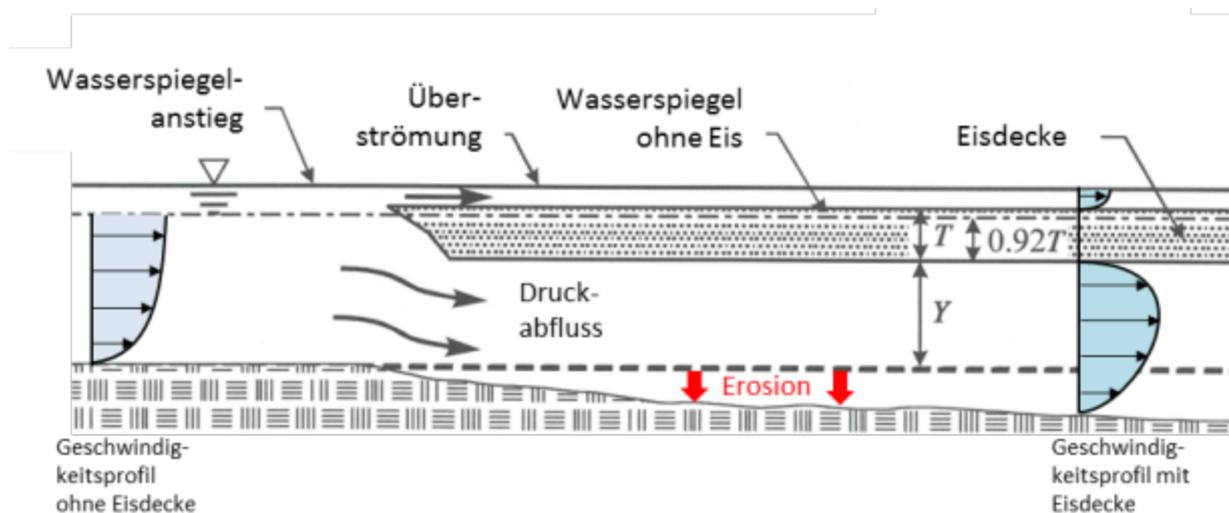


Abbildung 14: Hydraulische Folgen einer Eisdeckenbildung (mod. nach /7/)

4 Morphologie der Oder

4.1 Sohlenentwicklung

Die Oder ist einer der letzten großen Flüsse in Mitteleuropa, der im Unterlauf noch freifließend und nicht staugeregelt ist. Damit bestehen weitgehend natürliche Abfluss- und Wasserstands-dynamiken sowie eine ungestörte Durchgängigkeit für Sedimente. Der Sedimenthaushalt ist ebenfalls weitgehend intakt und es besteht weder ein Geschiebedefizit noch eine Abpflasterungstendenz der Sohle wie an staugeregelten Strömen /15/.

Durch das geringe Gefälle werden mitgeführte Sedimente im Unterlauf tendenziell abgelagert. In Abbildung 15 ist dazu die Sohlenentwicklung der Grenzoder für verschiedene Zeitabschnitte (Epochen) im Längsschnitt dargestellt. Die Datengrundlage sind Peildaten, die von der BfG „[...] als vollständigste und belastbarste Grundlage für die Beschreibung der Gewässerbettentwicklung der Grenzoder in den letzten Jahrzehnten angesehen [werden].“ [/15/, S. 68]

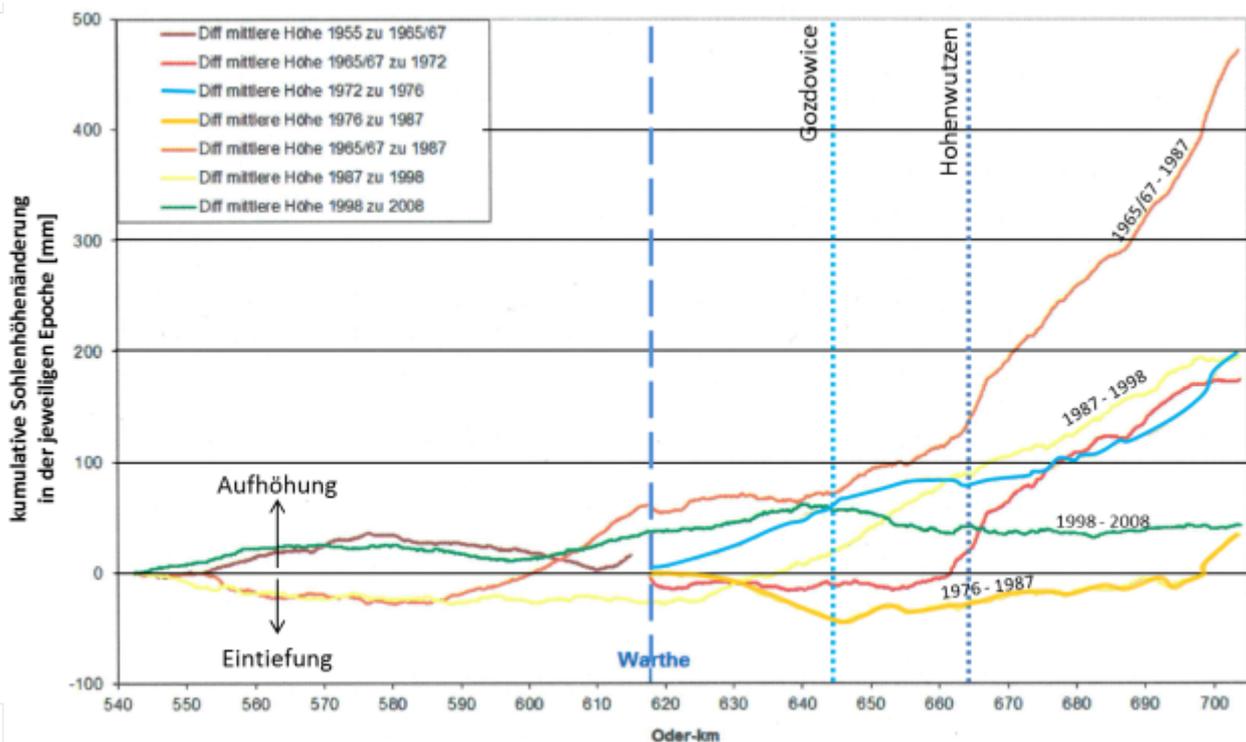


Abbildung 15: Sohlenhöhenänderung zwischen zwei Peilungen (mod. aus /15/)

Aus Abbildung 15 lassen sich die folgenden Schlüsse ableiten (/15/, S. 68 ff):

- Oberhalb der Warthemündung (km 542 - 590) hat eine Trendumkehr stattgefunden. Bis Mitte der 60er Jahre fand tendenziell eine Aufhöhung statt, die zwischen 1967 und 1987 in eine Eintiefung umgeschwenkt ist, die bis 1998 anhielt. Seitdem ist wieder eine Tendenz zur Aufhöhung festzustellen. Die Sohlenänderungen, also Eintiefung oder Aufhöhung, liegen im Abschnitt oberhalb der Warthemündung stets in der Größenordnung von 20 mm zwischen zwei Peilungen, umgerechnet also **1 - 2 mm pro Jahr**.

- Unterhalb der Warthemündung besteht eine Tendenz zur Ablagerung und Sohlenaufhöhung der Oder. Diese nimmt in Fließrichtung mit abnehmendem Gefälle immer mehr zu. Die größten Auflandungen ergaben sich in der Epoche 1965/67 - 1987 mit bis zu 480 mm, was ca. **25 mm pro Jahr** entspricht.
- Trotzdem lagen auch Epochen mit Entiefungen vor. Dazu gehören 1976 - 1987 sowie 1965/67 – 1972, in denen sich der Abschnitt zwischen Gozdowice und Hohenwutzen um 5 - 40 mm eingetieft hat. Das entspricht umgerechnet **1 - 4 mm pro Jahr**.
- In der letzten betrachteten Epoche 1998 - 2008 hat sich die Aufhöhung stabilisiert und beträgt nur noch um 50 mm, also umgerechnet **4 - 5 mm pro Jahr**. Sie verläuft dabei sehr ausgeglichen über den gesamten Abschnitt unterhalb der Warthemündung.

Aus den Auswertungen schließt die BfG: „Hier zeigt das letzte Jahrzehnt [Anm.: 1998 - 2008] eine ausgeglichene Sohlenentwicklung, welche auch durch die Wasserspiegellagenentwicklung bestätigt ist. [...] Die starken Anlandungstendenzen [Anm.: im Abschnitt Hohenwutzen und Rückstaubereich der Ostsee] sind jedoch inzwischen abgeklungen und das System scheint mehr oder weniger im morphologischen Gleichgewicht zu sein. Dies gilt für den jüngsten Zeitraum insgesamt auch für die Betrachtung der gesamten Grenzoder-Strecke.“ [15/, S. 70]

4.1.1 Hochwassereinfluss auf die Sohlenentwicklung

Hochwasser haben einen Einfluss auf die Sohlenentwicklung. Da Echolotpeilungen der Sohle aber nur selten durchgeführt werden, ist eine Quantifizierung der unmittelbaren Hochwassereinwirkung oft nicht möglich. Damit bleibt offen, ob die relativ kurzfristigen Hochwasserereignisse nicht auch einen maßgeblichen Einfluss auf die längerfristige Entwicklung der Sohle im Sinne eines dynamischen, metastabilen Gleichgewichts nach Chorley und Kennedy (1971) haben.

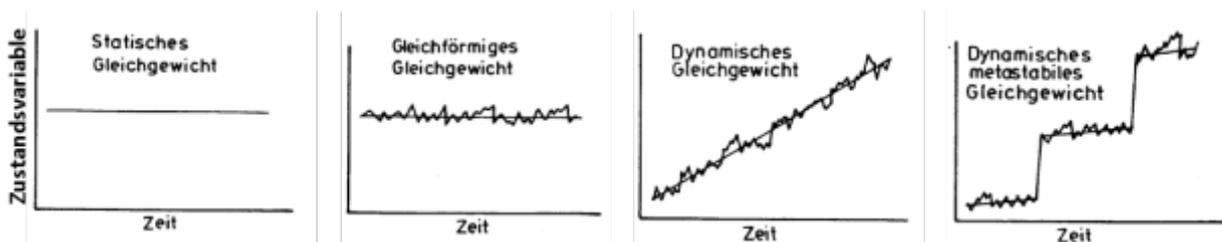


Abbildung 16: Morphologische Gleichgewichtszustände nach Chorley und Kennedy (1971)

In der SRK heißt es zum Hochwassereinfluss auf die Odersohle: „Etwa bis zum Jahr 2000 wurden in dem Abschnitt 2 von Od-km 630 bis Od-km 660 deutliche Sohlauflandungen beobachtet. Diese betragen seit den 50er Jahren etwa 50 cm [Anm.: umgerechnet also ca. 10 mm pro Jahr] und sind durch Sohlpeilungen, Wasserspiegelfixierungen und Pegelauswertungen belegt (Hüsener et al, 2010; [12] [17] [23]). Etwa seit dem Jahr 2000 oder nach dem außergewöhnlichen Hochwasser 1997 scheint diese Aufhöhung abgeklungen zu sein. Neuere Naturdaten zeigen hier eine weitgehend stabile mittlere Höhenlage der Odersohle [...]“. [1/, S. 97]

4.2 Dünen und Transportkörper

Die Sedimente im Unterlauf bestehen überwiegend aus Mittelsanden mit einem Korndurchmesser unter 1,0 mm ab Hohensaaten. Schon bei geringen Fließgeschwindigkeiten wird Sand dieser Korngröße mobilisiert und von der Strömung mitgeführt. Sandsohlen bilden dabei selbstorganisierte Strukturen, die sog. Transportkörper. Diese umfassen Sandriffel (Länge bis 0,3 m bei Korngrößen unter 0,6 mm), Dünen (Länge etwa 6-fache Wassertiefe, Höhe etwa bis 1/3 der Wassertiefe) bis hin zu Sandbänken (alternierend zwischen linkem und rechtem Ufer, Länge \gg Flussbreite). Im Bericht der BfG /15/ werden zur Dimension von Transportkörpern in der Oder folgende Angaben (Steiner, 2007) gemacht, denen Untersuchungen im physikalischen Modell zugrunde liegen:

- Dünen: 0,1 - 1,7 m hoch und 2 - 40 m lang
- Großdünen: bis 1,6 m hoch und 40 - 100 m lang
- Sandbänke: 370 - 450 m lang

Transportkörper bewegen sich deutlich langsamer als die Strömung fort. Kleinere Dünen von ca. 0,3 m Höhe migrieren in der Oder etwa 2 - 2,5 m/h /15/. Das entspricht etwa einem Tausendstel der Fließgeschwindigkeit. Große Strukturen wie Sandbänke sind mit 1,5 m/d (aus /15/) noch langsamer. Das entspricht etwa der Fließgeschwindigkeit geteilt durch 50.000 (0,02 ‰).

Der Sedimenttransport verringert sich durch die langsame Migration gegenüber einer ebenen Sohle und Dünen wirken stabilisierend auf die Sohle. Trotzdem sind Dünen nicht räumlich oder zeitlich fixiert, sondern immer in Bewegung. Hinzu kommt, dass verschieden große Transportkörper simultan auftreten und sich durch die unterschiedliche Migrationsgeschwindigkeit gegenseitig überwandern. In der Oder entstehen dadurch dreidimensionale Überlagerungsmuster (Abbildung 17, Abbildung 18).

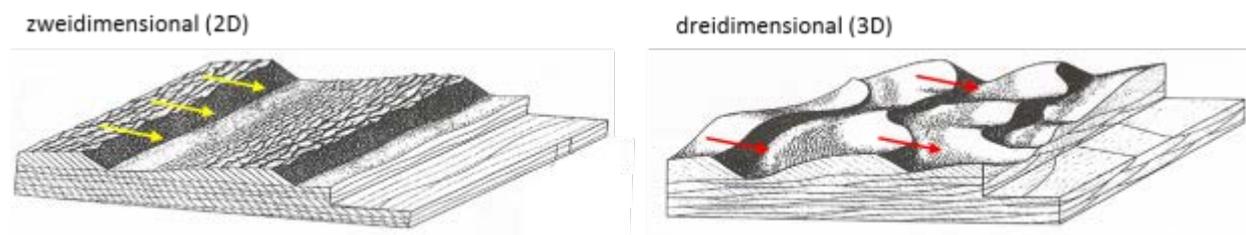


Abbildung 17: Zweidimensionale und dreidimensionale Dünen (aus Reineck und Sing, 1975)

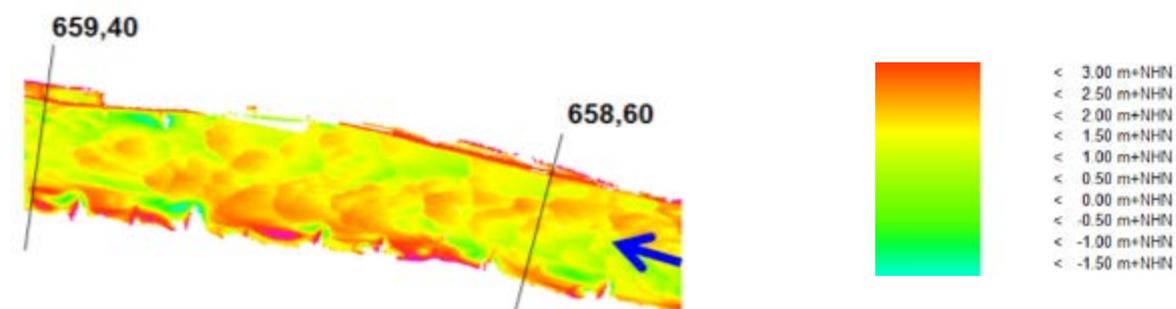


Abbildung 18: Dreidimensionale Dünenstruktur des physikalischen BAW-Odermodells (aus /1/)

Für regelmäßige Dünen mit zweidimensionaler Struktur wurden Ansätze für die Dünengeometrie und Dünenhöhe abgeleitet, die gut funktionieren (in Raudkivi, 1976, vgl. Kapitel 4). Die dreidimensionale Überlagerung macht es dagegen unmöglich, die exakte Sohlenhöhe / Wassertiefe an einem Ort zu einer bestimmten Zeit zu berechnen. Auch eine statistische Beschreibung, z.B. über den Mittelwert der Dünenhöhe plus Schwankungsmaß, ist nicht ohne weiteres möglich.

Wie sich Dünengeometrie und Überlagerungsmuster im Winter durch die Eisbildung verändern, ist überhaupt noch nicht bekannt und damit nicht berechenbar.

4.2.1 Dünen als Lebensräume für Organismen

Dünen bilden sich bei mittlerem Strömungsangriff, der z.B. über das Produkt aus Sohlenschubspannung und Fließgeschwindigkeit ausgedrückt wird (stream power). Nimmt die hydraulische Belastung zu, so gerät immer mehr Sand in Suspension und wird wie als Schwebstoff transportiert – die Dünen lösen sich dann allmählich auf. Genauso bilden sich Dünen bei abnehmendem Strömungsangriff zurück, was zu einer Einebnung der Sohle führt. Eine Auflösung von Dünen ist also vorübergehend möglich. Sobald sich wieder ein mittlerer Strömungsangriff einstellt und genug Sediment vorhanden ist, beginnt die Dünenbildung erneut.

Dünen stellen eigentlich nur dann günstige benthische Habitate bereit, wenn ihre Mobilität bei abnehmendem Strömungsangriff zurückgeht. Ist dies nicht der Fall, so können nur gut angepasste und eher kleine benthische Organismen Dünen besiedeln. Ein Beispiel sind die Larven von Zuckmücken (Amsler et al., 2009), die ihr Gewicht durch Aufnahme von Sandkörnern erhöhen und sich so vor der Verdriftung durch die Strömung schützen.

Als Laichhabitate, z.B. für den Ostseeschnäpel (*Coregonus maraena*) zwischen Dezember und April, eignen sich ebenfalls nur Dünen, die nicht sehr mobil sind. Ansonsten wird der Laich von der Düne überwandert und aufgrund des Sauerstoffdefizits im Sediment faulen (mdl. Mitteilung C. Wolter, IGB Berlin). Eine Erhöhung der Dünenmobilität würde also die Laichbedingungen und den Laicherfolg verschlechtern.

Neben der Bereitstellung von Habitaten haben Dünen eine wichtige Funktion für die Selbstreinigungskraft des Gewässers. Dünen werden dabei aktiv durchströmt, wobei Flusswasser durch die Düne wie durch einen Filter hindurchgepresst wird. Die Filterwirkung ist dabei sowohl mechanisch durch das Korngerüst als auch biochemisch durch die Besiedelung des Porenraums mit unterschiedlichen Bakterien. Partikuläres organisches Material wird auf diese Weise effizient zurückgehalten und mikrobiell abgebaut. Die fundamentale Bedeutung dieses Prozesses für die Selbstreinigung konnte an der Elbe für vergleichbare Dünengeometrien wie in der Oder nachgewiesen werden (Fischer et al., 2006).

4.3 Wirkweise von Buhnen

Die prinzipielle Wirkweise von konsekutiven Buhnen und Buhnenfeldern im Fluss lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Buhnen engen den Hauptfließquerschnitt (Fluss) ein.
- Dadurch erhöht sich die Fließgeschwindigkeit im Fluss. Gleichzeitig sinkt die Fließgeschwindigkeit in den Buhnenfeldern (Abbildung 19).
- Buhnen erhöhen die Turbulenz im Fluss und damit die Reibungsverluste.
- Die über den Gesamtquerschnitt (Buhnen und Flussbett) gemittelte Fließgeschwindigkeit nimmt insgesamt ab. Dadurch steigt der Wasserspiegel an.
- Erhöhte Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegel führen zu einer erhöhten Sohleschubspannung und damit tendenzieller flächiger Sohleneintiefung im Hauptquerschnitt.
- Mit der flächigen Eintiefung im Hauptquerschnitt geht eine flächige Auflandung der Buhnenfelder einher.
- Nahe den Buhnenköpfen kommt es zusätzlich zu starker lokaler Erosion (Buhnenkopfkolke, Abbildung 19).
- Erst wenn die Buhnen bei hohen Wasserständen überströmt werden, kann ein Teil des abgelagerten Sediments auch wieder aus den Buhnenfeldern erodiert werden. Die grundsätzliche Tendenz zur Verlandung bleibt jedoch unverändert.

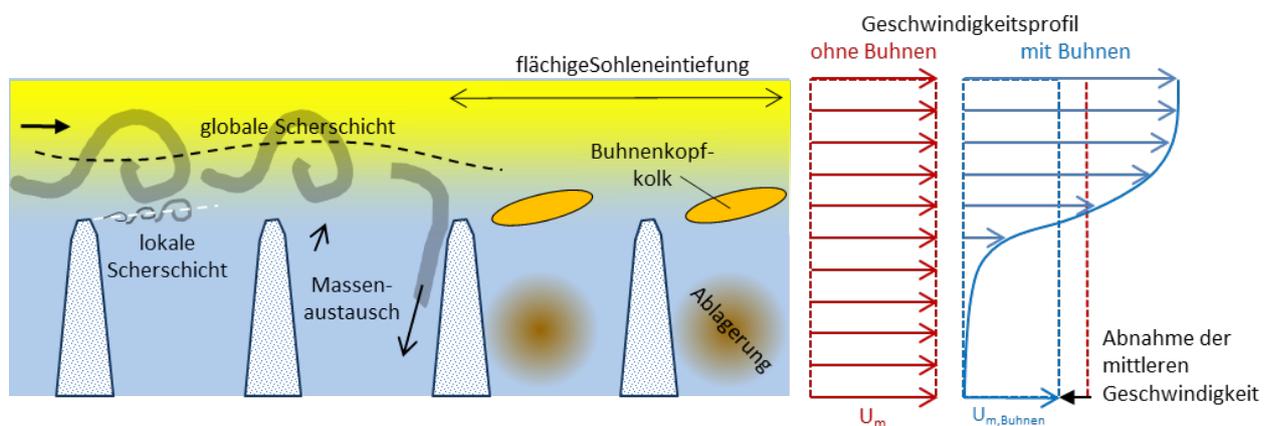


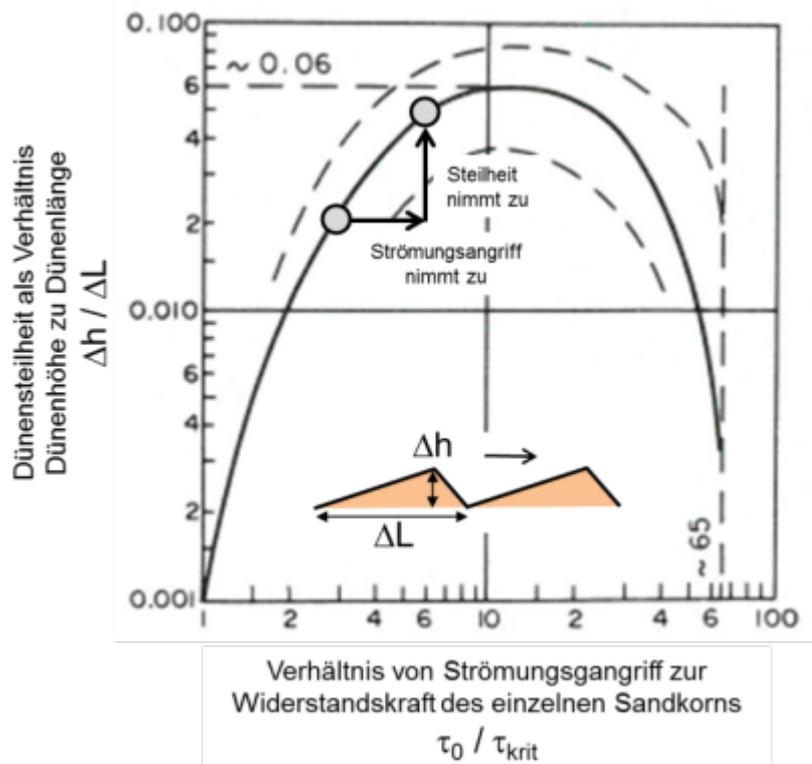
Abbildung 19: Strömung und Morphologie um und in Buhnenfeldern (Mittelwasserhältnisse)

Strömungsablösungen an den Buhnenköpfen leisten einen wesentlichen Beitrag zur Rauheitswirkung von Buhnen. Durch die großen Geschwindigkeitsgradienten an den Buhnenköpfen entstehen lokale Scherschichten, die zu erhöhter Turbulenzproduktion führen. Wirbel bilden sich, wachsen an und zerfallen schließlich. Dabei wird der Strömung kinetische Energie entzogen und in Reibungswärme umgewandelt. Im Bereich der lokalen Scherschichten und ihrer erhöhten Turbulenz kommt es auch zu verstärkter Erosion der Sohle – erkennbar an den typischen Buhnenkopfkolken (Abbildung 19).

4.3.1 Wechselwirkungen zwischen Buhnen und Dünen

Buhnen führen zu einer Modifikation der Geschwindigkeitsverteilung und der Turbulenzcharakteristik im Fließquerschnitt. Beide wirken sich grundsätzlich erosiv auf die Flusssohle aus. Bei sandigen Flusssohlen, wie in der Oder, muss berücksichtigt werden, dass sich die Transportkörper, besonders Dünen und Sandbänke, den Änderungen der Strömung und Turbulenz dynamisch anpassen.

Bisher fehlen Berechnungsansätze für die Form und Größe dreidimensionaler Dünen. Für die einfacheren zweidimensionalen Dünen wurde der Zusammenhang zwischen Strömungsangriff und Dünenhöhe aber nachgewiesen (Raudkivi, 1976, vgl. Abbildung 20). Dass sich dreidimensionale Dünen zumindest tendenziell ähnlich verhalten, ist nicht auszuschließen.



Im Bereich $\tau_0/\tau_{krit} < 10$ nimmt die Steilheit $\Delta h/\Delta L$ mit zunehmendem Strömungsangriff τ_0 bis zum Maximum von $\Delta h/\Delta L \sim 0,06$ zu und die Dünen werden steiler und damit höher.

Für $\tau_0/\tau_{krit} > 10$ wird immer mehr Sand in Suspension transportiert und die Dünen werden flacher, bis sie sich schließlich ganz auflösen ($\tau_0/\tau_{krit} > 65$).

Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Dünensteilheit und Schubspannungsüberschuss für zweidimensionale Dünen (mod. aus Raudkivi, 1976)

In Tabelle 3 sind die sedimentologischen und hydraulischen Daten für den Ist-Zustand und die Anwendung des Diagramms zusammengestellt. Es zeigt sich, dass bei Mittelwasserabflüssen der Schubspannungsüberschuss τ_0/τ_{krit} in der gesamten Grenzoder weit unter dem Wert von 10 liegt. Für Hochwasserhältnisse lässt sich beispielsweise für Oder-km 618 eine Wassertiefe von 5,5 m annehmen, die bei unverändertem Gefälle nur zu einer geringen Erhöhung des Schubspannungsüberschusses auf $\tau_0/\tau_{krit} = 4,6$ führt. Auch bei Hochwasserabflüssen wird der Wert von 10 in der Oder also nicht erreicht. Die Odersohle liegt somit über das gesamte Abflussspektrum im linken Bereich der Verteilung in Abbildung 20, in dem Schubspannungserhöhungen zur Zunahme der Dünensteilheit und -höhe führen.

Tabelle 3: Berechnung des Schubspannungsüberschusses an wichtigen Punkten der Oder

Oder-km	Korngröße d_{50} (mm)	Bewegungsbeginn nach Shields τ_{krit} (N/m ²)	Wassertiefe h (m)	Gefälle I_0 (-)	Berechneter Strömungsangriff τ_0 (N/m ²)	Schubspannungsüberschuss τ_0 / τ_{krit} (-)
	SRK (Bild 3-4)		bei EMW (SRK Bild 6-10)	bei EMW (SRK Bild 3-5)		
542	1,0	1,0	2,8	2,8E-04	2,8	2,9
617	0,7	0,7	2,9	2,4E-04	2,6	3,8
618	0,8	0,8	3,3	2,4E-04	2,8	3,6
700	0,5	0,5	3,7	4,2E-05	1,2	2,5

Durch den Ausbau der Bühnen gemäß SRK steigen Strömungsangriff und Sohlenschubspannung im Flussbett. Zweidimensionale Dünen in der Grenzoder würden dadurch über das gesamte Abflussspektrum steiler und höher werden. Diese Entwicklung der Dünen würde einer durch den Bühnenausbau erwünschten Sohleneintiefung entgegenwirken.

Weiterhin hat sich gezeigt, wie wichtig die Turbulenz der lokalen Scherschicht für die Sohle und die Dünenstruktur nahe der Bühnen ist. Durch flachere Bühnenkopfnegungen wird die Scherschichtbildung gestört. Dadurch werden die Bühnenkopfkolke verringert (Abbildung 21 aus /1/, S. 125). Hier ist aber anzumerken, dass es in physikalischen Modellen sehr schwierig ist, eine gute Übereinstimmung mit Naturdaten zu bekommen. Dies wird in Abbildung 22 deutlich, die eine gute Übereinstimmung der Grobstruktur, aber auch deutliche Abweichungen in der Feinstruktur und den Bühnenkopfkolken aufzeigt. Dabei spielt wiederum die Turbulenz eine wichtige Rolle, die aufgrund des Modellmaßstabs und der einzuhaltenden Modellgesetze von der Natur abweicht (Sukhodolov et al., 2006).

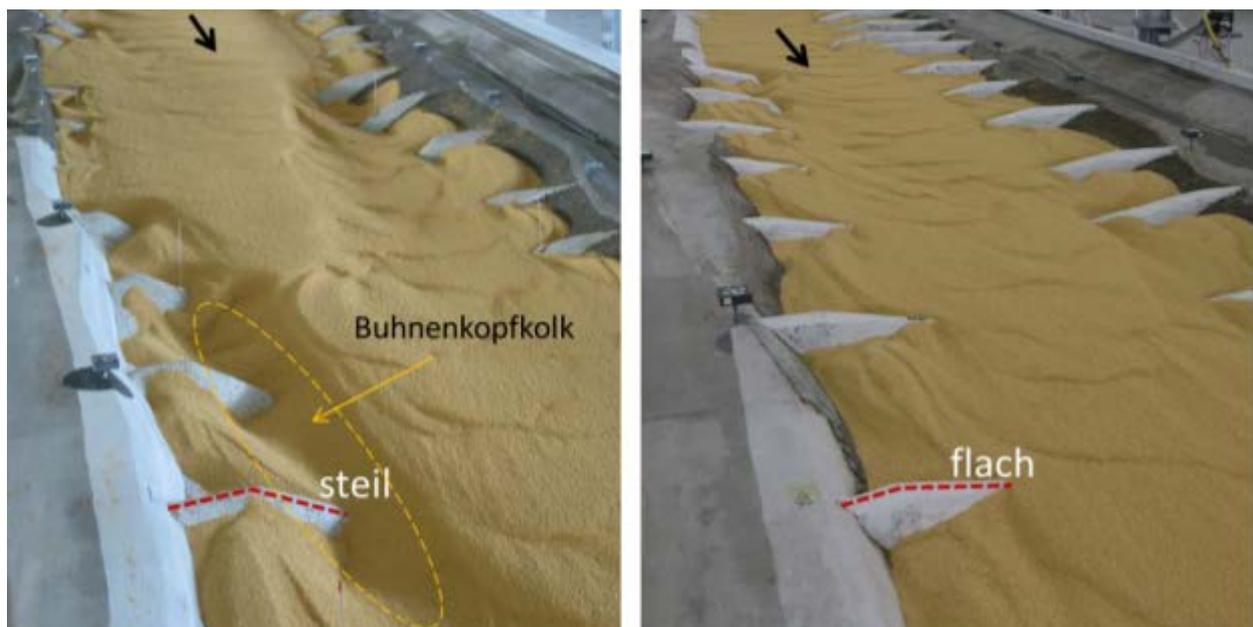


Abbildung 21: Verminderung der Bühnenkopfkolke durch Abflachung der Bühnenkopfnegung im physikalischen Oder-Modell der BAW (mod. aus /1/, S. 125)

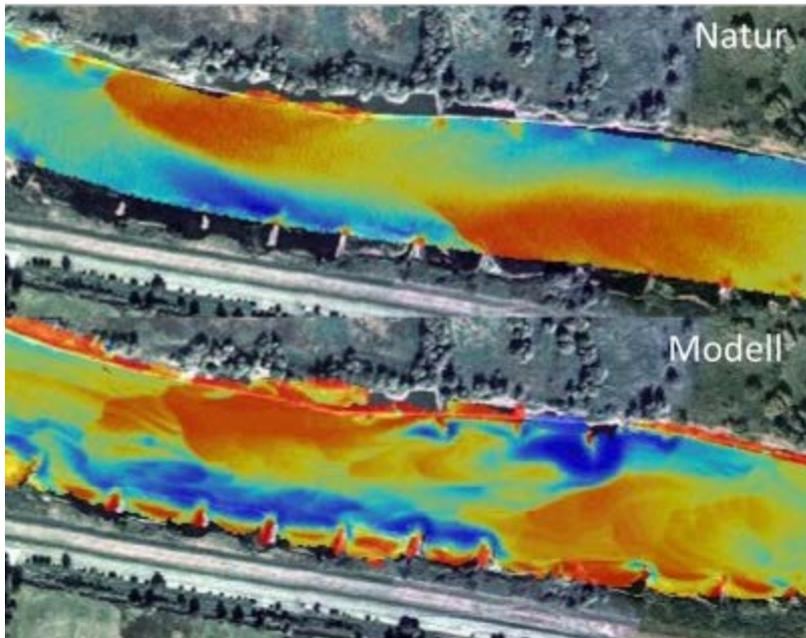


Abbildung 22: Sohlenstruktur im Vergleich Natur und physikalisches Modell (mod. aus /1/, S. 74)

4.3.2 Buhnen als Lebensräume für Organismen

Dass Buhnenfelder wertvolle Ersatzhabitate bereitstellen und daher Biodiversitäts-Hotspots sind, ist bekannt (Kleinwächter et al., 2017). Aber auch aquatische Habitate, die durch die Strömung und Turbulenz im Bereich um die Buhnen entstehen, werden von vielen Arten genutzt.

Hierzu gehören die Buhnenkopfkolke, die auch dann stabil sind, wenn sich die Flusssohle in Bewegung befindet oder Dünen wandern. Durch die höhere kinetische turbulente Energie lagern sich in Buhnenkopfkolke keine Feinsedimente ab und auch die Bildung von Grundeis wird verhindert. Buhnenkopfkolke sind daher wichtige Winterhabitate für Fische (Rakowitz et al., 2013). Durch eine Abflachung der Buhnenkopfeigungen bilden sich die Buhnenkopfkolke zurück oder gehen ganz verloren (vgl. Abbildung 21). Ihre Funktion als Ersatzhabitat geht gleichermaßen verloren.

5 Hochwasserschutzkonzept Międzyodrze-Polder

Im Rahmen des u.a. von der Weltbank finanzierten „Odra-Vistula Flood Management Project“ wird auf polnischer Seite vorgesehen, Międzyodrze (Zwischenoderland) von Widuchowa bis kurz vor Szczecin zum gesteuerten Flutpolder für den Hochwasserschutz auszubauen. Dazu wäre eine durchgängige Eindeichung von Międzyodrze durch 60 km Trenndeiche sowie der Bau von Ein- und Auslaufbauwerken (Flutungstore, Überläufe) erforderlich.

Międzyodrze liegt zwischen der West- und Ostoder, wobei etwa 60% der Flächen auf einem Geländeniveau zwischen 0,3 und 0,5 m ü NHN liegen (Buchholz, 2007). Dadurch ist Międzyodrze Teil der aktiven und dynamischen Überflutungsaue der Oder. Es wird regelmäßig überstaut und trägt als natürlicher Retentionsraum zum Hochwasserschutz bei. Das Arteninventar bzw. die Biotopausprägung als Indikatoren der ökologischen Funktion wurden durch Ernennung zum Natura 2000-Gebiet unter Schutz gestellt.

Im Zuge des Ausbaus der West- und Ostoder wurde Międzyodrze zu Beginn des 20. Jahrhunderts zum Polder ausgebaut, um eine landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen. Der Ausbau zielte ausschließlich auf einen Schutz der ertragreichen Schwemmsandwiesen vor Überflutung durch die seit 1878 ansteigenden Sommer-Mittelwasserstände und vor kleineren Sommerhochwassern in der Oder. Überschwemmungen der Wiesen im Winter und Frühjahr waren aufgrund der nährstoffreichen Sedimenteinträge auch weiterhin erwünscht (Kieseritzky, 1938).

Bis 1930 wurden dazu Polderdämme, Verbindungs- und Entwässerungskanäle, Pumpwerke und Schleusen im Międzyodrze errichtet. Dieser historische Zustand dient auch als Vorlage für den geplanten Neuausbau im Weltbank-Projekt. Der Großteil der Infrastruktur wurde im Zweiten Weltkrieg jedoch zerstört. Die landwirtschaftliche Poldernutzung wurde daraufhin aufgegeben und seitdem nicht wieder aufgenommen. Międzyodrze weist damit heute wieder eine potentiell natürliche Überflutungsdynamik auf.

5.1 Allgemeines zu Flutpoldern

5.1.1 Begriffe und Definitionen

Verwendete Begriffe zu Poldern entsprechen den Definitionen nach DWA (Tabelle 4). Danach sind „Polder“ zum Schutz vor Überflutungen eingedeichte Niederungen, wobei „Trockenpolder“ nach Möglichkeit immer trocken bleiben sollen und „Nasspolder“ zeitweilig bewusst geflutet werden, z.B. für eine landwirtschaftliche Bewässerung. Wenn die Hauptfunktion im Hochwasserschutz liegt, so werden Polder als „Flutpolder“ bezeichnet (Synonym „Flutungspolder“ nach DIN 19712 in DWA, 2014).

Mit „Trenndeichen“ werden nachfolgend Deiche bezeichnet, die den Flutpolder vom Fluss abtrennen. Die historischen Sommerdeiche um Międzyodrze sind in ihrer hydraulischen Funktion also ebenfalls Trenndeiche. Ein- und Auslassbauwerke in den Trenndeichen, z.B. Überlaufschwelle oder Fluttore, ermöglichen die Flutung und Entleerung des Flutpolders.

5.1.2 Flutpolder-Betriebsweisen

Die Funktion von Flutpoldern besteht darin, durch die seitliche Entnahme von Wasser aus der fließenden Welle Hochwasserabflüsse zu mindern und Hochwasserspitzen zu dämpfen. Dabei wird zwischen kontrollierten und gesteuerten Betriebsszenarien unterschieden (Tabelle 5).

Tabelle 4: Begriffe und Definitionen von Poldern (aus DWA 2014)

Polder (hier definiert als Gebiet, das vor Hochwasser geschützt werden soll)	Durch linienförmige Hochwasserschutzanlagen (z. B. Deiche, Mauern, mobile Elemente) gegen Überflutung geschütztes Gebiet; hinsichtlich der Binnenentwässerung werden offene Polder (mit Freispiegelentwässerung) und geschlossene Polder (mit Zwangsentwässerung z. B. Schöpfwerk) unterschieden.
Flutpolder (hier definiert als Raum, der dem Hochwasserschutz dient)	Nicht durchflossener, abfluss- oder wasserstandsabhängig im Bereich des Bemessungshochwassers ungesteuert (Überlaufstrecke) oder gesteuert (Einlassbauwerk) mit Einstauhöhen unwesentlich über der Wasserspiegellage im Hauptgewässer beaufschlagter und nach Durchgang des Hochwasserscheitels kontrolliert entleerter (Auslassbauwerk) Raum zur Zwischenspeicherung eines bestimmten Volumens der Hochwasserwelle.
Fließpolder (hier definiert als Raum, der dem Hochwasserschutz dient)	Durchflossener, abfluss- oder wasserstandsabhängig im Bereich des Bemessungshochwassers ungesteuert (Überlaufstrecke) oder gesteuert (Einlassbauwerk) beaufschlagter Raum zur Ableitung eines bestimmten Teilabflusses. <i>ANMERKUNG:</i> Damit grenzen sich <i>Fließpolder</i> deutlich von <i>Flutrinnen</i> (die meistens selbst durch linienförmige Hochwasserschutzanlagen begleitet sind) und <i>Deichrückverlegungen</i> (die weit vor dem Bemessungshochwasserereignis beaufschlagt werden) ab.

Tabelle 5: Betriebsszenarien von Flutpoldern (aus DWA 2014)

Betriebsszenario	Ort	zeitlicher Verlauf
„unkontrolliert“	nicht festgelegt	ungeregelt
„bedingt kontrolliert“	nicht festgelegt	wasserstandsabhängig
„kontrolliert“	festgelegt	wasserstandsabhängig
„gesteuert“	festgelegt	geregelt

Das höchste Potential für den Hochwasserschutz hat ein gesteuerter Flutpolder, bei dem der Ort der Flutung durch Eindeichung klar definiert ist und zeitlich eine Steuerung über regelbare Ein- und Auslassbauwerke erfolgen kann. Damit lassen sich Hochwasserspitzen gezielt kappen, wenn sie eintreffen. Am wenigsten Kontrolle liegt beim unkontrollierten Flutpolder vor. Dieses Szenario ist z.B. ein Deichversagen, bei dem die Flutung weder zeitlich noch räumlich gesteuert abläuft.

Die für die Betriebsszenarien erforderlichen baulichen Maßnahmen und Steuerungsorgane sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Ein gesteuerter Flutpolder erfordert demnach regelbare Einlassbauwerke wie z.B. Schütze.

Tabelle 6: Bauliche Maßnahmen (aus DWA 2014)

Bauliche Maßnahme, z. B.	Betriebsszenario
Deich mit Innendichtung (erosionsstabile Systeme)	„bedingt kontrolliert“
Überlaufstrecke (Entlastung ohne Regelorgane)	„kontrolliert“
Einlassbauwerk mit Schützen (Entlastung mit Regelorganen)	„gesteuert“

Flutpolder sind dann besonders effizient, wenn eine steile Hochwasserspitze auftritt und das Poldervolumen in Relation zum Abfluss groß ist. Dies ist zumeist im Mittel- und Oberlauf der Flüsse der Fall. Bei langanhaltenden und flachen Hochwasserwellen, wie sie im Unterlauf von Flüssen typisch sind, sind Flutpolder weniger wirksam. Sie benötigen dann ein im Verhältnis zum Abfluss sehr großes Volumen, um über lange Zeit kontinuierlich geflutet werden zu können (Abbildung 24).

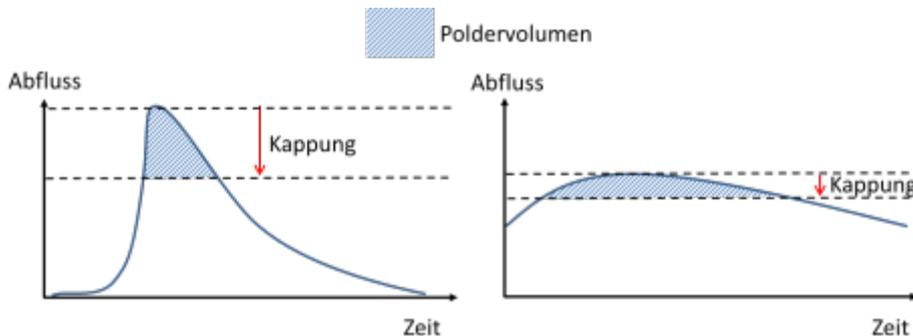


Abbildung 23: Scheitelkappung bei steiler / flacher HW-Welle und gleichem Poldervolumen

5.1.3 Bemessung von Flutpoldern

Das Volumen von Flutpoldern ergibt sich wasserstandsabhängig. Dazu muss berücksichtigt werden, welche Wasserstände am Einlaufbauwerk eintreten, wie hoch Trenndeiche und Überlaufdämme ausgeführt werden und ob der Polder durchströmt oder nur eingestaut wird.

Die Vielzahl an möglichen Steuerungsszenarien und die unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen erfordern bei Flutpoldern daher eine Modellierung. Dafür werden üblicherweise instationäre zweidimensionale Strömungsmodelle (2D HN-Modelle) eingesetzt.

Der typische Ablauf bei einer Polderkonzeption ist dazu in Abbildung 25 dargestellt. Erst durch die berechnete Wasserspiegellage in Verbindung mit einem Gelände-DGM kann eine exakte Bestimmung des Poldervolumens erfolgen.

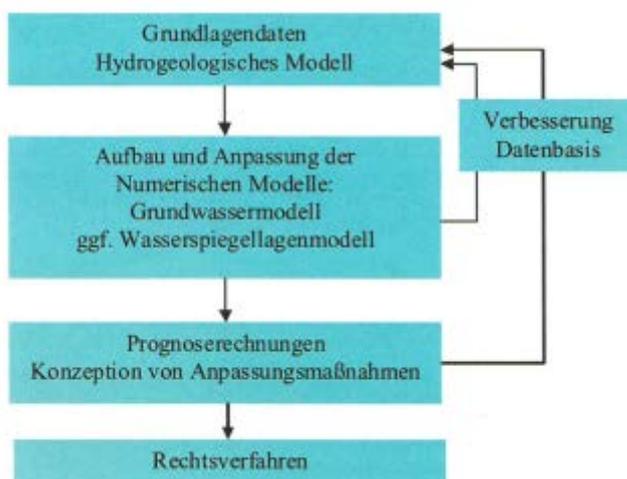


Abbildung 24: Vorgehensweise bei der Polderkonzeption (aus DWA 2014)

5.2 Flächen- und Poldergröße Międzyodrze

Die Gesamtfläche Międzyodrze setzt sich aus drei Teilflächen zusammen, die durch den Straßendamm der A6 (= A11 weiter westlich auf deutscher Seite) und die Verbindungsstraße Mescherin-Gryfino (B 133 / DW 120) voneinander getrennt sind (Abbildung 26). Die größte Teilfläche weist der „Widuchowa-Polder“ im Süden auf, etwas kleiner ist der mittlere „Gryfino-Polder“ und um ein Drittel kleiner der „Szczecin-Polder“ im Norden, der dafür aber etwas tiefer liegt. Der Straßendamm der Autobahn liegt über dem Geländeniveau und ist damit auch ein hydraulisch wirksamer Trenndamm zwischen den Teilpoldern. Die Verbindungsstraße Mescherin-Gryfino wurde dagegen ohne Damm ausgeführt und stellt damit keine hydraulische Trennung der beiden Teilpolder dar.

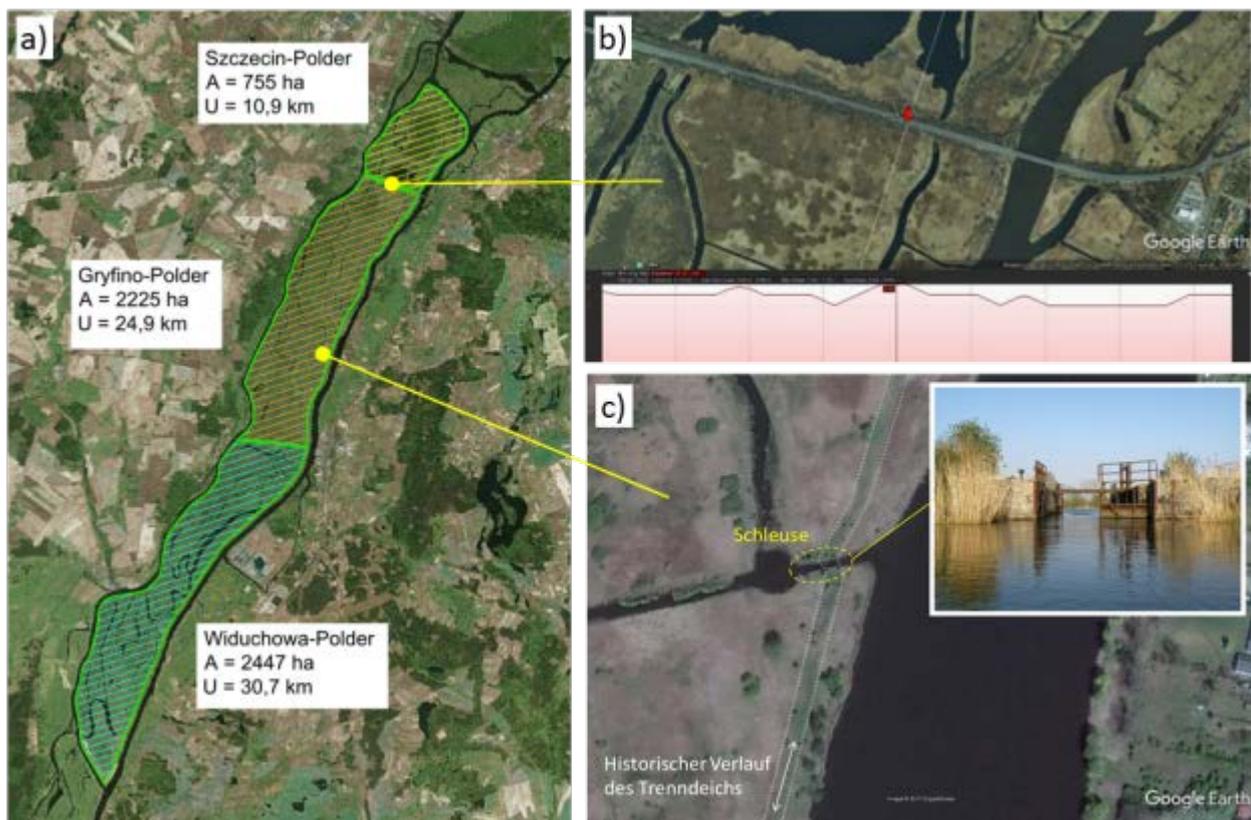


Abbildung 25: (a) Lage, Flächengröße A und Umringlängen U der Teilpolder Międzyodrze (b) Lage des Autobahndammes als Trennung zwischen den Szczecin- und Gryfino-Poldern (c) aus Luftbildern identifizierbarer Verlauf der historischen Trenndeiche (exemplarisch bei 53.287424°, 14.491020°) und Fotos der technischen Infrastruktur (Quelle: google earth)

Die Flächenangaben beziehen sich auf die hydraulisch nutzbare Fläche für Flutpolder. Als Umringspolygone der Polderflächen wurde der historische, noch in Luftbildern erkennbare Dammverlauf festgelegt (Abbildung 26). Noch vorhandene historische Siel- und Schleusenbauwerke dienten als zusätzliche Stützpunkte der Umringspolygone.

Die Polderflächen weichen je nach Literaturquelle und Definition des Außenrandes (Ufer, Randstreifen, Flussmitte, usw.) voneinander ab. Die berechneten Flächen der Polder stimmen etwa mit denen im Oder-Auen-Atlas (2012) des WWF-Deutschland und des WWF-Auen-Instituts überein (Tabelle 7).

Tabelle 7: Polderflächen aus Literatur (http://atlas.odra.pl/tab_3.html) und eigenen Berechnungen

	amtliche Unterlagen	WWF Oder-Auen-Atlas	eigene Berechnung 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
Międzyodrze gesamt	5.690 ha	5.488 ha	5.427 ha

Im „Project Appraisal Document“ (PAD /2/) zum Weltbank-Projekt wird das nutzbare Gesamt-Poldervolumen des Międzyodrze-Polders bei einer Einstautiefe von 1,0 m mit 1,0 Mrd. m³ angegeben („A one meter high water layer on the wetland would store about 1 billion m³ of floodwater“, S.38). Diese **Angabe ist falsch** und muss bei einer Polderfläche von 54,27 km² und bei einer rechnerischen mittleren Wassertiefe von 1,0 m entsprechend auf 54,27 Mio m³ (5,427 x 10⁷ m³) korrigiert werden. **Das Poldervolumen bei 1,0 m Einstautiefe entspricht also nur 5,4% des im PAD angegebenen Wertes.**

Wie in Kapitel 5.1.3 erläutert, kann eine exakte Bestimmung des Flutpoldervolumens erst über eine hydraulische Modellierung und berechnete Wasserspiegellagen erfolgen. Dazu müssen auch die Kronenhöhe der Trenndeiche sowie Lage und Wasserstände der Ein- und Auslaufbauwerke bekannt sein.

Im WWF-Oder-Auen-Atlas (2012) finden sich Angaben zum bestehenden Poldervolumen (Tabelle 8). Wie die Volumen bestimmt wurden, ist dabei jedoch nicht erläutert.

Tabelle 8: Poldervolumen aus der Literatur (http://atlas.odra.pl/tab_3.html)

	Poldervolumen WWF Oder-Auen-Atlas	rechnerische mittlere Einstautiefe
Szczecin-Polder	2,7 Mio m ³	0,36 m
Gryfino-Polder	10 Mio m ³	0,44 m
Widuchowa-Polder	19 Mio m ³	0,77 m
Międzyodrze gesamt	31,7 Mio m³	0,58 m

Die rechnerischen mittleren Einstautiefen in Tabelle 8 wurden durch Division des Poldervolumens durch die jeweilige Polderfläche in Tabelle 7 bestimmt und ergänzt.

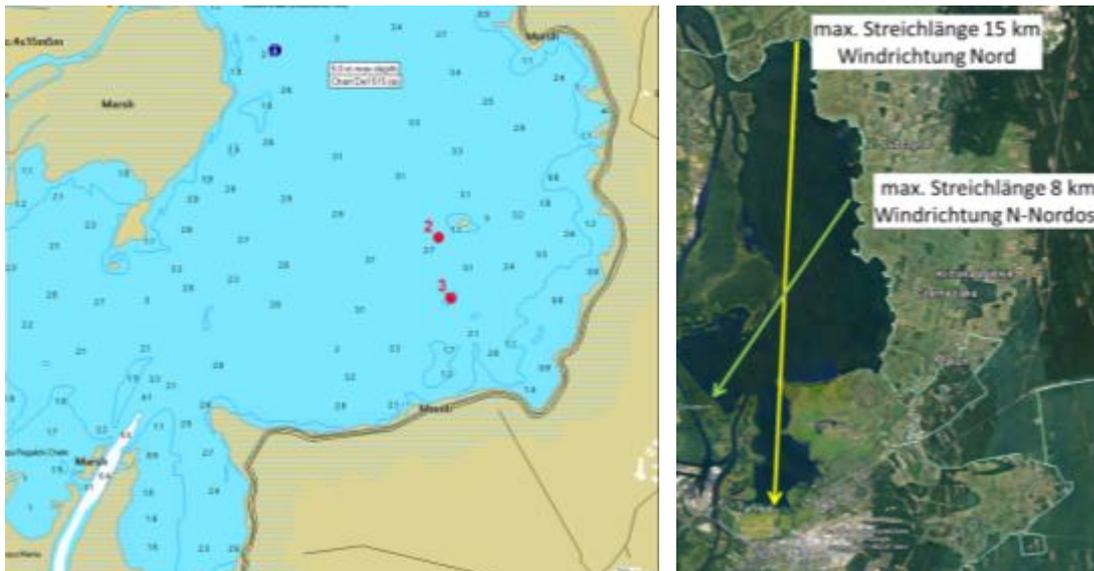


Abbildung 27: Tiefenkarte des Dammschen Sees (Quelle: <http://jkazs.szn.pl/sites/default/files/wpt.jpg>) und maximale Wind-Streichlänge für Szczecin im Dammschen See (Quelle: google earth)

Winddaten sind in Abbildung 29 für die nahegelegenen DWD-Stationen Ueckermünde und Angermünde als Windrosen aufgetragen. Daraus geht hervor, dass die für den Windstau in Szczecin relevanten Winde aus Nord und Nord-Nordost seltener auftreten (Darstellung durch die Länge der Windsektoren), aber Windgeschwindigkeiten bis etwa 9,0 m/s erreichen können (Darstellung durch die Farbskala der Windsegmente).

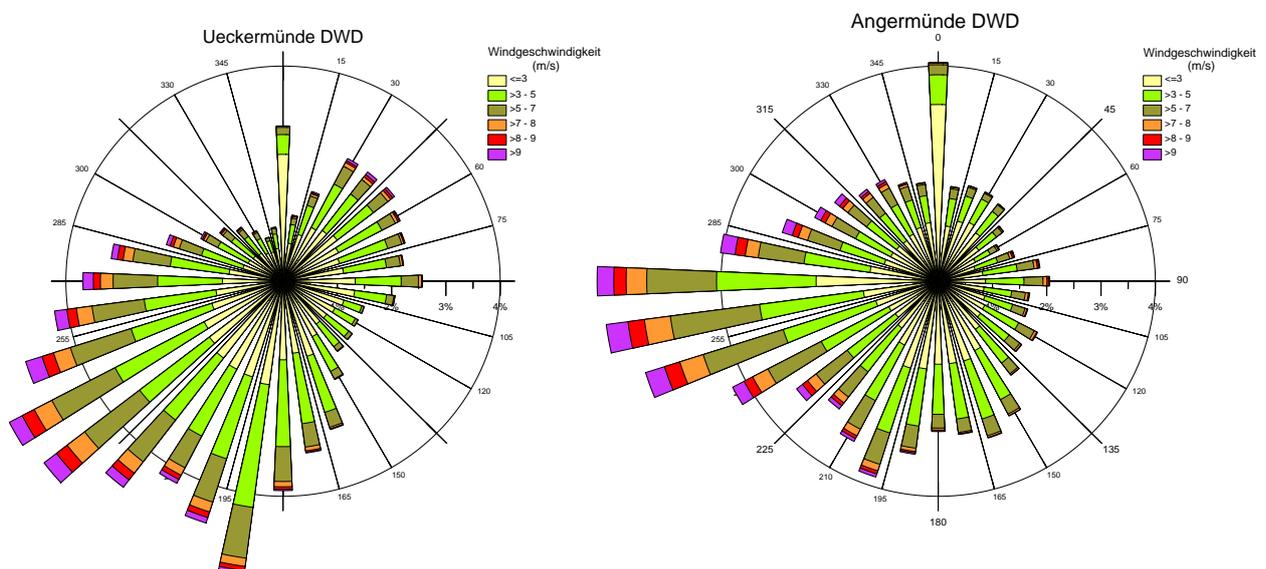


Abbildung 28: Windrosen für die DWD-Stationen Ueckermünde und Angermünde (Datenquelle: /14/)

Mit diesen Winddaten und den Nomogrammwerten nach Wagner (1969) für die turbulente Zustandsgröße der Wasseroberfläche und Windschubspannung ergibt sich ein Windstau von 3 cm in Szczecin.

Windstau im Dammschen See ist unter den betrachteten Bedingungen keine relevante Einflussgröße für den Hochwasserschutz in Szczecin.

5.4 Funktionen und Wirkung eines Międzyodrze-Flutpolders

Wie in den Kapiteln zur Hydrologie und Hochwassern an der Unteren Oder (3.2 und 3.3) dargestellt, ist das hydraulische System um Międzyodrze komplex. Eine optimierte Bemessung und Steuerung der Teilpolder bei unterschiedlichen Abflussszenarien erfordert daher den Einsatz eines 2D-HN-Modells. Die grundsätzliche Funktion und daraus abgeleitete Betriebsweise eines gesteuerten Flutpolders Międzyodrze lassen sich aber auch ohne Modellierungen wie folgt zusammenfassen:

- Für eine Scheitelkappung der Oder-Hochwasserspitze sind die Bedingungen ungünstig, da der Polder weit im Unterlauf liegt und die Hochwasserganglinie dort schon stark abgeflacht verläuft (vgl. Kapitel 3.3). Eine Hochwasserspitze ist daher kaum noch vorhanden, stattdessen halten hohe Abflüsse und Wasserstände über einen langen Zeitraum hinweg plateauartig an. Um eine Kappung zu erreichen, muss der Polder über eine entsprechend lange Zeit, d. h. mehrere Tage bis Wochen, geflutet werden können. Das nutzbare Poldervolumen ist dann aber relativ klein gegenüber den hohen Abflüssen der Oder und somit kein wirksamer Abschlag möglich. Die Wirksamkeit für eine Scheitelkappung ist daher von vorneherein als eher gering einzuschätzen. Eine Beispielrechnung erfolgt in Kapitel 5.5.
- Die Steuerung von Międzyodrze-Flutpoldern soll auch dem Schutz der Stadt Szczecin dienen. Wie im Kapitel 3.3 dargelegt, ist der Wasserstand in Szczecin aber vom Stettiner Haff und damit der Ostsee geprägt. Strömende Abflusszustände bei niedrigen Froude-Zahlen, wie in der Unteren Oder, werden von unterstrom aus kontrolliert. Um also überhaupt für Szczecin wirksam sein zu können, müsste ein Polder unterhalb Szczecins oder zwischen Dammschem See und Stettiner Haff liegen. Międzyodrze erfüllt diese Anforderung nicht.
- Auch eine mögliche Scheitelkappung oberhalb von Szczecin wirkt sich kaum noch auf die Wasserstände in Szczecin selbst aus. Buchholz (2007) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass beim extremen Hochwasser 1997 mit Scheitelabflüssen über 2.600 m³/s die Wasserstände im Haff und auch bei Szczecin kaum anstiegen (vgl. Abbildung 10). Gleichermassen würde sich die mögliche Abflussminderung durch einen Flutpolder nicht wesentlich auf den Wasserstand bei Szczecin auswirken.
- Windeinwirkung auf den Dammschen See kann aufgrund der geringen Seewassertiefe unter 5,0 m keinen größeren Windstau verursachen. Maßgeblich für Szczecin sind dabei Winde aus nördlicher Richtung, bei denen der Windstau jedoch nur in der Größenordnung weniger Zentimeter liegt (vgl. Kapitel 3.5.1).
- Bereits heute und ohne weitere Maßnahmen funktioniert Międzyodrze natürlicherweise wie ein Fließpolder (vgl. Kapitel 5.1.1), der bei Hochwasser durchströmt wird. Damit vergrößert sich der Fließquerschnitt der Unteren Oder und die Wasserstände sinken, was sich positiv auf die Hochwassersituation auswirkt. Durch Trenndeiche und einen gesteuerten Betrieb zur Scheitelkappung würde dieser positive Effekt zunichte gemacht und der Polder wäre bis zur Flutung nicht als zusätzlicher Fließquerschnitt wirksam. Dadurch würden sich vor und nach der Flutung im Bereich des Polders höhere Wasserstände in der Oder einstellen.

5.5 Beispielrechnung zur Wirksamkeit der Scheitelkappung

Nachfolgend wird eine Beispielrechnung durchgeführt, um die Polderwirkung exemplarisch für die Hochwasser 1997 und 2010 zu bestimmen. Vereinfachend werden alle drei Teilpolder zu einem einzigen zusammengefasst. Die Flutung erfolgt von oberstrom über den Einlass bei Widuchowa, d. h. der Pegel Widuchowa ist der Referenzpegel für die Flutung (Abbildung 30).

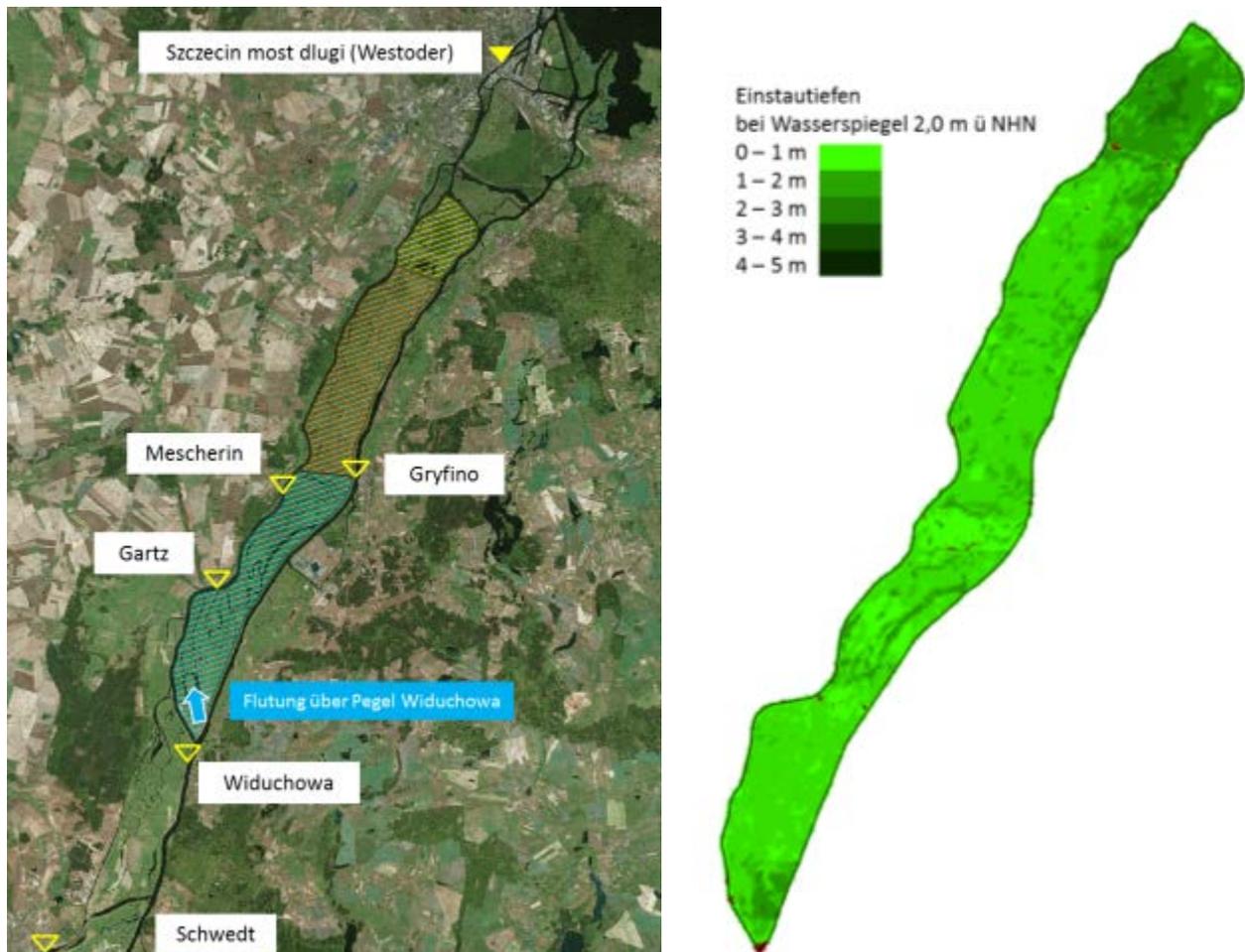


Abbildung 29: Pegel für die Beispielrechnung mit Einlaufbauwerk bei Widuchowa und aus dem DGM /12/ berechnete Einstautiefen exemplarisch für eine Wasserspiegellage von 2,0 m ü NHN

Der mittlere Hochwasserstand am Pegel Widuchowa beträgt MHW = 1,52 m ü NHN. Der Hochwasserscheitel lag 2010 bei 2,30 m ü NHN bei einem Abfluss von 2.350 m³/s und 1997 bei 2,59 m und 2.980 m³/s (Abbildung 31, Daten entsprechen den Angaben in /9/, Tab. 2-1).

Aus den Daten wurden Schlüsselkurven rekonstruiert, die für eine Berechnung des Wasserstands bei einem Abschlag in den Polder verwendet werden können (Abbildung 32).

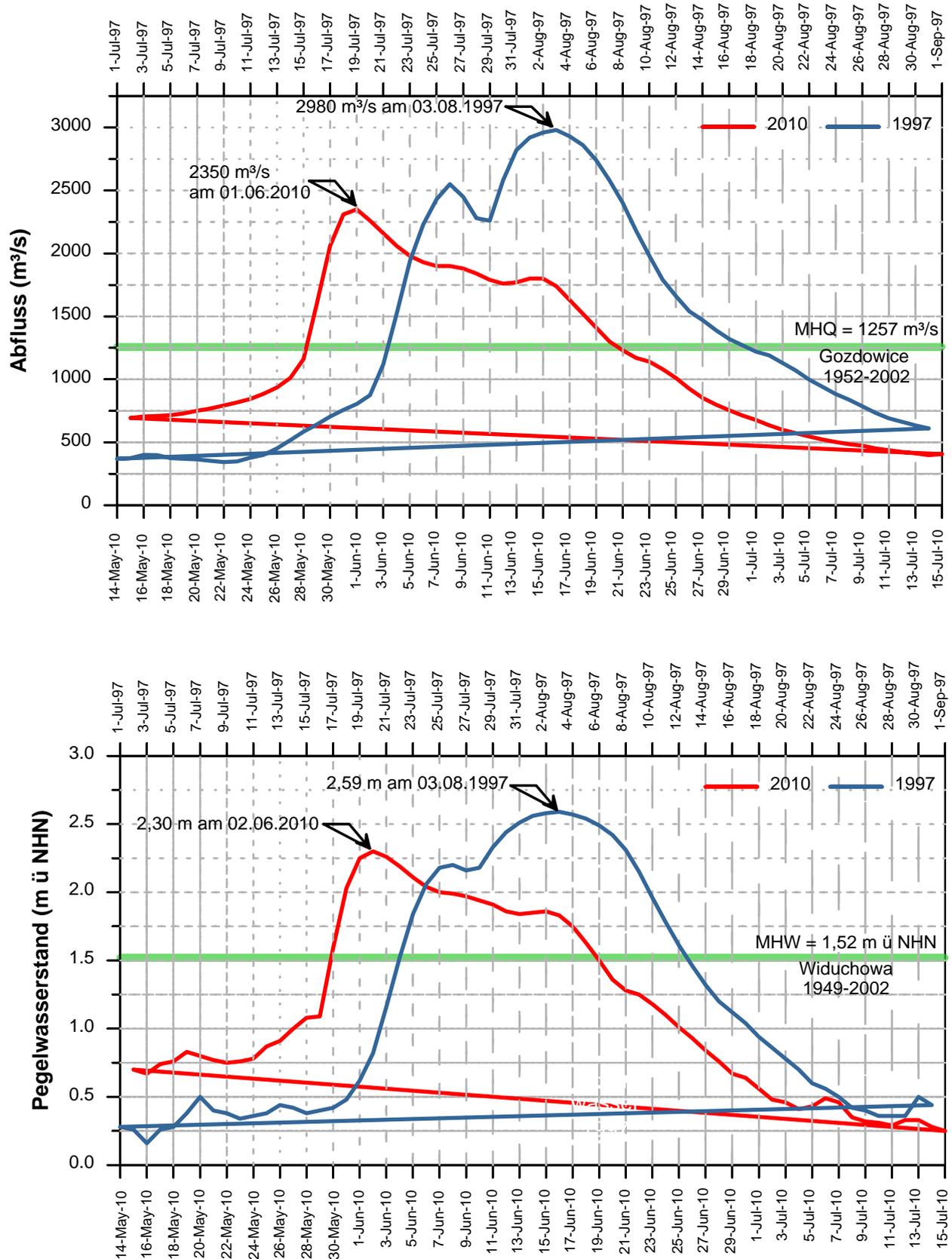


Abbildung 30: Hochwasserganglinien für Abfluss und Wasserstand 1997 und 2010 am Pegel Widuchowa (Datengrundlage /11/)

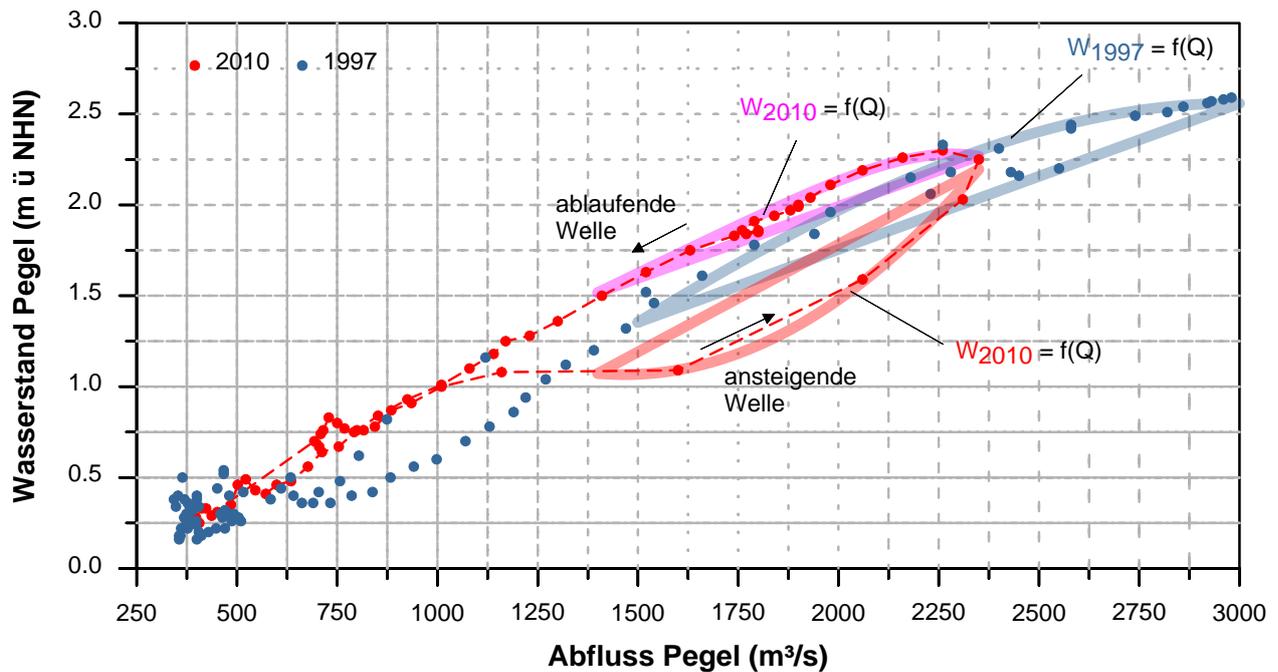


Abbildung 31: Abfluss-Wasserstands-Beziehungen für die Hochwasser 1997 und 2010 am Pegel Widuchowa. Das Ereignis 2010 weist eine starke Hysterese auf, die bis zu 0,7 m Wasserpiegelunterschied bei gleichem Abfluss ergibt.

Derzeit liegen noch keine detaillierteren Planungen für den Ausbau von Międzyodrze zum Flutpolder vor. Für das nutzbare Poldervolumen müssen daher Annahmen getroffen werden.

Neben den Volumenangaben im WWF-Oder-Auen-Atlas und der korrigierten Angabe im PAD (vgl. Kapitel 5.2), dient der mittlere Hochwasserstand MHW = 1,5 m ü NHN am Pegel Widuchowa als dritter Orientierungswert für das Poldervolumen. Als vierten Fall wurde der MHW um weitere 0,5 m erhöht, entsprechend 2,0 m ü NHN am Pegel Widuchowa.

In CIVIL-3D wurden für die Fälle MHW und MHW+0,5 m horizontale Wasserflächen mit dem DGM für Międzyodrze /12/ verschnitten und aus den Differenzen die Volumina berechnet (vgl. Abbildung 30). Die vier Betrachtungsfälle sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Wasserstände und Poldervolumen für die Beispielrechnungen

Bemessungs-Fall	Polderwasserstand (m ü NHN)	Poldervolumen (Mio m ³)	mittlere Einstautiefe (m)
Oder-Auen-Atlas	0,38	31,7	0,58
PAD /2/ korrigiert	0,8	54,3	1,0
Ausbau auf MHW	1,5	92,2	1,7
Ausbau über MHW	2,0	119,4	2,2

Die Orientierungswerte für die Wasserspiegellage im Polder (MHW, MHW+0,5 m) sind nicht mit der Kronenhöhe der Trenndeiche gleichzusetzen. Hier wäre für eine Schutzwirkung des Polders beim Hochwasser 1997 ein Ausbau auf mindestens 2,6 m ü NHN Kronenhöhe erforderlich gewesen (ohne Berücksichtigung eines Freibordes und Sicherheitszuschlags für Windstau).

Obwohl die Angaben des Poldervolumen zunächst hoch erscheinen, sind sie gegenüber den Abflüssen in der Oder relativ gering. Beispielsweise füllt sich ein Polder mit einem Volumen von 54,3 Mio m³ bei einem Abschlag von 150 m³/s innerhalb von etwa 4 Tagen.

Die Berechnungen der Wirkung des Poldervolumens auf die Hochwasserganglinie erfolgten damit in drei Schritten:

- Bestimmung des Scheitelabflusses, ab dem der Polder geflutet wird. Durch iterative Berechnungen wurde der Scheitelabfluss so festgelegt, dass die darüber hinausgehende Abflussmenge (Abschlag) in der Summe genau dem Poldervolumen entspricht.
- An Tagen mit Abschlag wurde der Wasserstand für den verbleibenden Abfluss in der Oder mit Hilfe der Schlüsselkurven angenähert (Abbildung 32).
- Die Kappung der Hochwasserscheitel wurde schließlich aus der Differenz zwischen dem realen und berechneten Wasserstand mit Polderabschlag berechnet.

Ergebnisse der Berechnung mit verschiedenen Poldervolumen sind für das Hochwasser 2010 in Abbildung 33 und für das Hochwasser 1997 in Abbildung 34 zusammengestellt. Die Abbildungen enthalten jeweils für das Poldervolumen von 54,3 Mio m³ eine gemeinsame Darstellung von Abfluss und Wasserstand (jeweils obere Grafik). In einem zweiten Diagramm (jeweils untere Grafik) wurde jeweils nur die Wasserstandsganglinie für die vier betrachteten maximalen Poldervolumen von 31,7 bis 119,4 Mio m³ dargestellt (vgl. Tabelle 9).

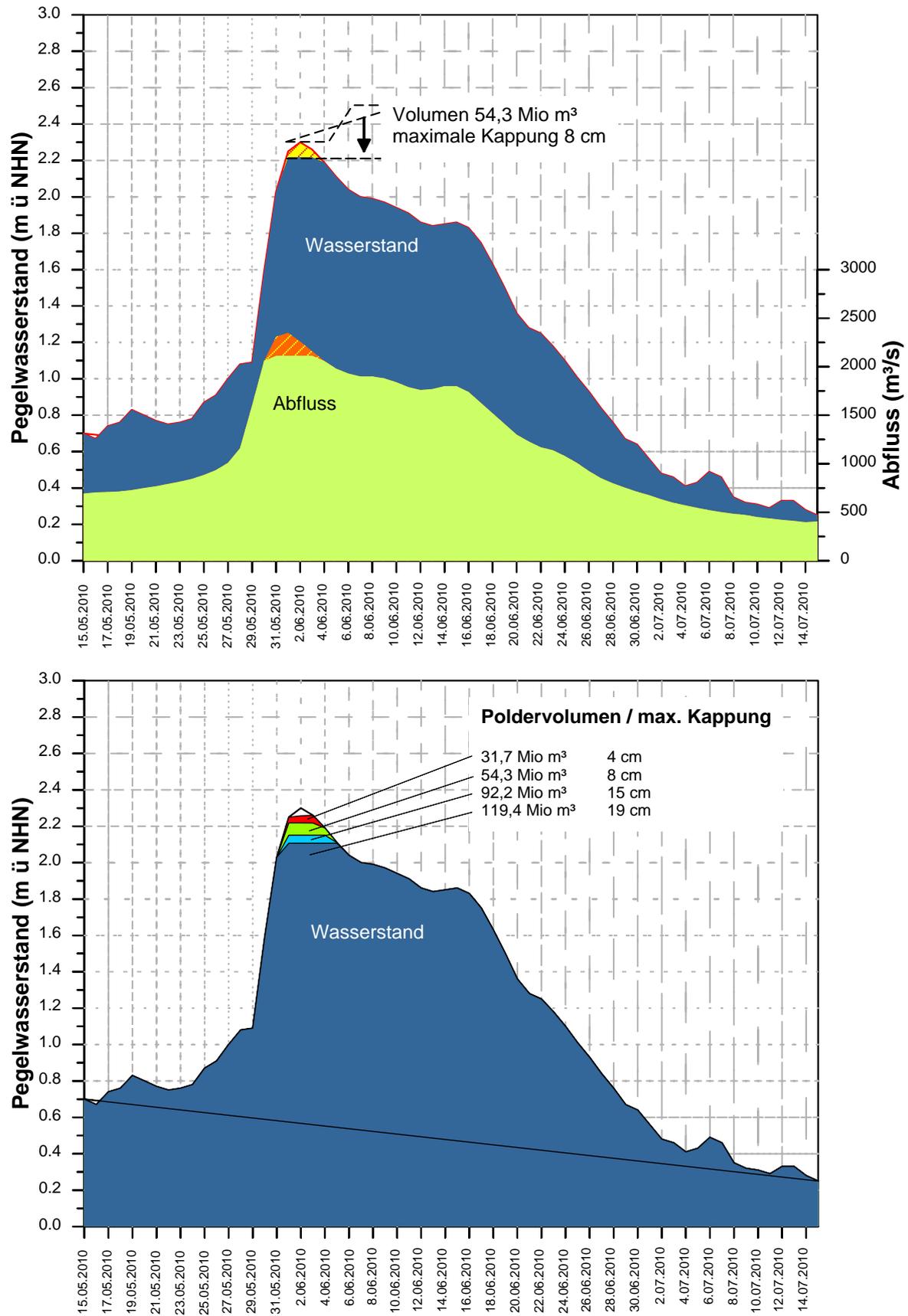


Abbildung 32: Wirkung des Poldervolumens auf Abfluss und Wasserstand der Oder am Pegel Widuchowa exemplarisch für das Oder-Hochwasser 2010 (Datenquelle: /11/)

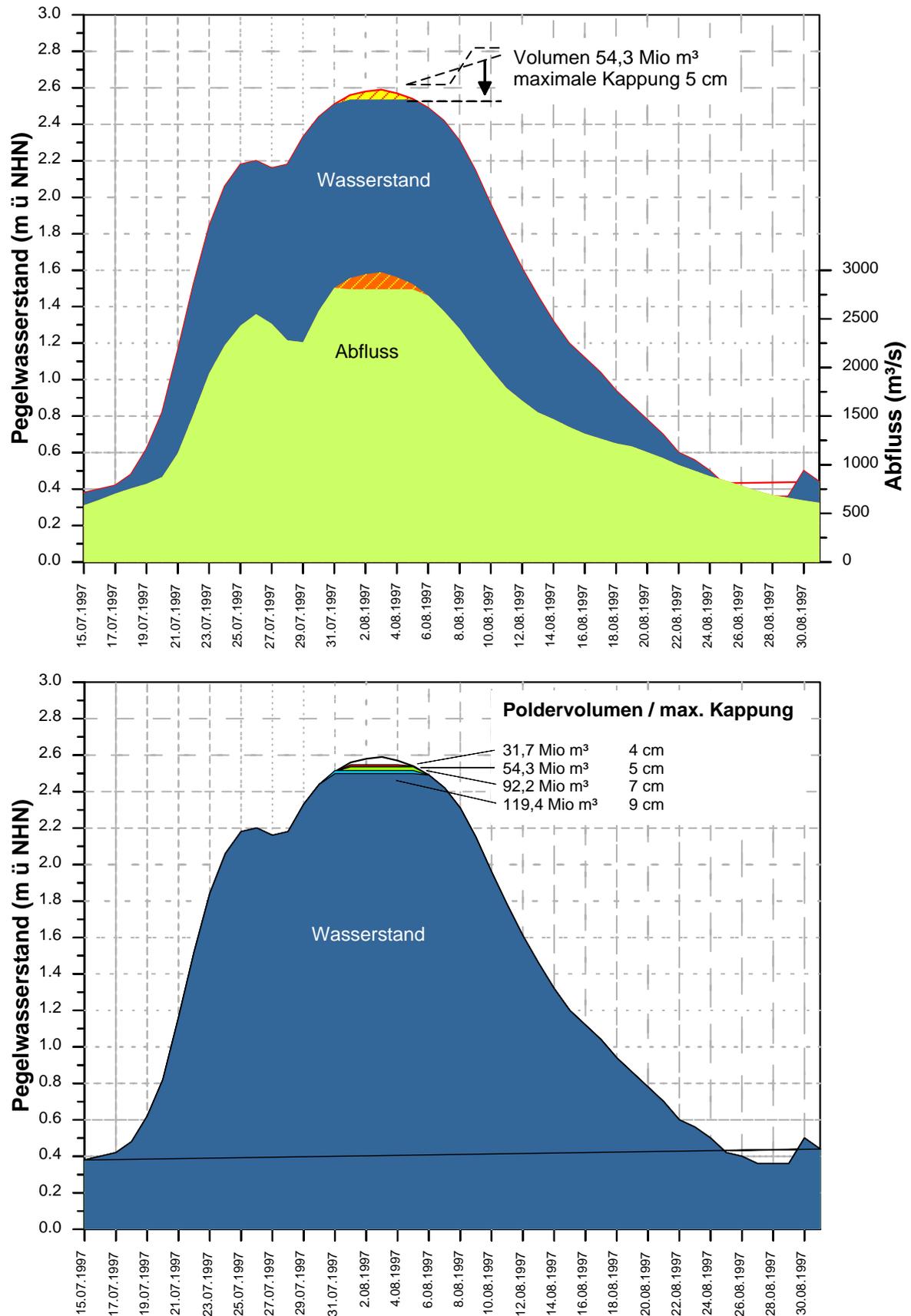


Abbildung 33: Wirkung des Poldervolumens auf Abfluss und Wasserstand der Oder am Pegel Widuchowa exemplarisch für das Oder-Hochwasser 1997 (Pegeldaten: /11/)

Wie erwartet, ist die Wirkung eines Ausbaus zum gesteuerten Flutpolder Międzyodrze auf die Hochwasserwelle eher gering. Beim Hochwasser 2010 sind bei einem Poldervolumen von 54,3 Mio m³ gerade einmal 8 cm maximale Kappung am Pegel Widuchowa möglich. Beim extremeren Hochwasser 1997 reduziert sich dieser Betrag auf 5 cm am Pegel Widuchowa.

Die Beispielrechnungen sind stark vereinfacht und spiegeln eine ideale Steuerung und Füllung wider. Beispielsweise ist die Hochwasserganglinie in der Realität nicht im Voraus bekannt, so dass keine ideale Steuerung und Kappung erreicht werden kann. Die Wirksamkeit des Polderausbaus ist daher in jedem Fall geringer als die hier berechneten Werte. Präzisierungen müssen daher im Rahmen einer Vorplanung mit Hilfe eines hydronumerischen Strömungsmodells (2D) erfolgen, wie in Kapitel 5.1.3 bereits erwähnt. Dabei kann auch berücksichtigt werden, wie sich die Trenndeiche auf die Hochwasserdynamik auswirken. Bei Nutzung als Flutpolder wird die bisherige Funktion von Międzyodrze als natürlicher Fließpolder aufgegeben. Damit steht für die anlaufende Hochwasserwelle weniger Fließquerschnitt zur Verfügung und die Wasserstände reagieren schneller auf die Abflusserhöhung. Dieser Effekt konnte bei den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Das größte betrachtete Poldervolumen (119,4 Mio m³) hätte beim Hochwasser 2010 maximal 19 cm und 1997 maximal 9 cm Scheitelkappung in Widuchowa bewirken können. Hierbei ist zu beachten, dass der bauliche Aufwand bei der Herstellung der dazu erforderlichen, höheren Trenndeiche einen wesentlichen Faktor in der Kosten-Nutzen-Analyse darstellt. Auf gut 65 km Länge müssten dazu die Trenndeiche vor Sickerströmungen und Überströmung geschützt werden.

Ohne Strömungsmodell lassen sich keine genaueren Aussagen über die Wirkung des Polders auf die Wasserstände unter- und oberhalb machen. Die Wirkung ist direkt am Pegel Widuchowa am größten und nimmt nach unterstrom ab. Für Szczecin gilt, dass die Polderwirkung aller Voraussicht nach kaum noch nachweisbar sein wird. Grund hierfür sind die rückstaugeprägten Verhältnisse (vgl. Kapitel 3.5), auf die sich geringe Abflussänderungen kaum mehr auswirken dürften. Die Polderabschläge bei einem Volumen von 54,3 Mio m³ erreichen dabei nur etwa 5% des Abflusses der Oder.

5.6 Wirksamkeit des Flutpolders bei Kappung ab 1.600 m³/s

Zusätzlich zur optimierten Steuerung in Kapitel 5.5 wird nachfolgend betrachtet, wie sich eine Scheitelkappung ab 1.600 m³/s auswirken würde. Diese Angabe stammt aus den historischen Betrachtungen, die von Kieseritzky (1938) erläutert werden: „Sommerdeiche an der Ostoder sollten dazu dienen, das Wasser aus dem Oderlauf in geschlossenem Querschnitt [Anm.: d. h. ohne Ausuferung der West- und Ostoder] bis zu einer Wasserführung von 1600 m³/sek bei gleichzeitigem Aufstau im Dammschen See von + 0,7 m NN zusammenzuhalten, und erst bei einer größeren Wasserführung sollte eine Überflutung des ganzen Wiesengebietes unterhalb Crieort [Anm.: dazu gehört Międzyodrze] eintreten können.“ [S. 289].

Eine Flutung schon bei 1.600 m³/s sollte dabei den Rückstau möglichst gering halten und die ähnlich tief wie Międzyodrze gelegenen Flächen um Cedynia und im Oderbruch vor Überflutung schützen (vgl. Kapitel 5.7).

Berechnungen dazu erfolgten analog wie in Kapitel 5.5 erläutert. Durch die frühe Öffnung des Flutpolders während der ansteigenden Welle sind die Abschlüsse mit bis zu 460 m³/s bei einem Poldervolumen von 54,3 Mio m³ sehr hoch. Entsprechend schnell kommt es zur Füllung des Polders. Die Füllzeiten für die jeweiligen Poldervolumen sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Zum Vergleich wurde die Zeit ab der Flutung bis zum Eintreffen des HW-Scheitels mit angegeben.

Tabelle 10: Füllzeit der Polder für einen Abschlag ab 1.600 m³/s und Zeit bis zum Eintreffen des HW-Scheitels nach Öffnung des Polders in Tagen (d)

Bemessungs-Fall	Polder-volumen (Mio m ³)	Füllzeit HW 1997 (d)	Scheitel HW 1997 nach (d)	Füllzeit HW 2010 (d)	Scheitel HW 2010 nach (d)
Oder-Auen-Atlas	31,7	1,0	12	0,8	3
PAD /2/ korrigiert	54,3	1,5	12	1,2	3
Ausbau auf MHW	92,2	2,1	12	1,9	3
Ausbau über MHW	119,4	2,5	12	2,3	3

Daraus geht hervor, dass in allen betrachteten Fällen der Polder bereits vor Eintreffen des HW-Scheitels gefüllt wäre (Füllzeit < Scheiteleintreffen). Damit ist keine Kappung mehr möglich und der Hochwasserscheitel durchläuft das Gebiet so, als ob keine Poldersteuerung vorhanden ist.

In Abbildung 35 ist die Wirkung eines Abschlages ab 1.600 m³/s exemplarisch für ein Poldervolumen von 54,3 Mio m³ für beide Hochwasser 1997 und 2010 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass kein Poldervolumen mehr zur Verfügung steht, wenn die Hochwasserscheitel eintreffen. Eine Poldersteuerung mit Abschlag bereits ab 1.600 m³/s ist damit nur für kleinere Sommerhochwasser wirksam und sinnvoll, wie es auch historisch vorgesehen war (Kieseritzky, 1938). Für extremere Ereignisse mit Scheitelabflüssen über ca. 2.000 m³/s ist der Polder nur wirksam, wenn die Flutung später erfolgt (vgl. Kapitel 5.5).

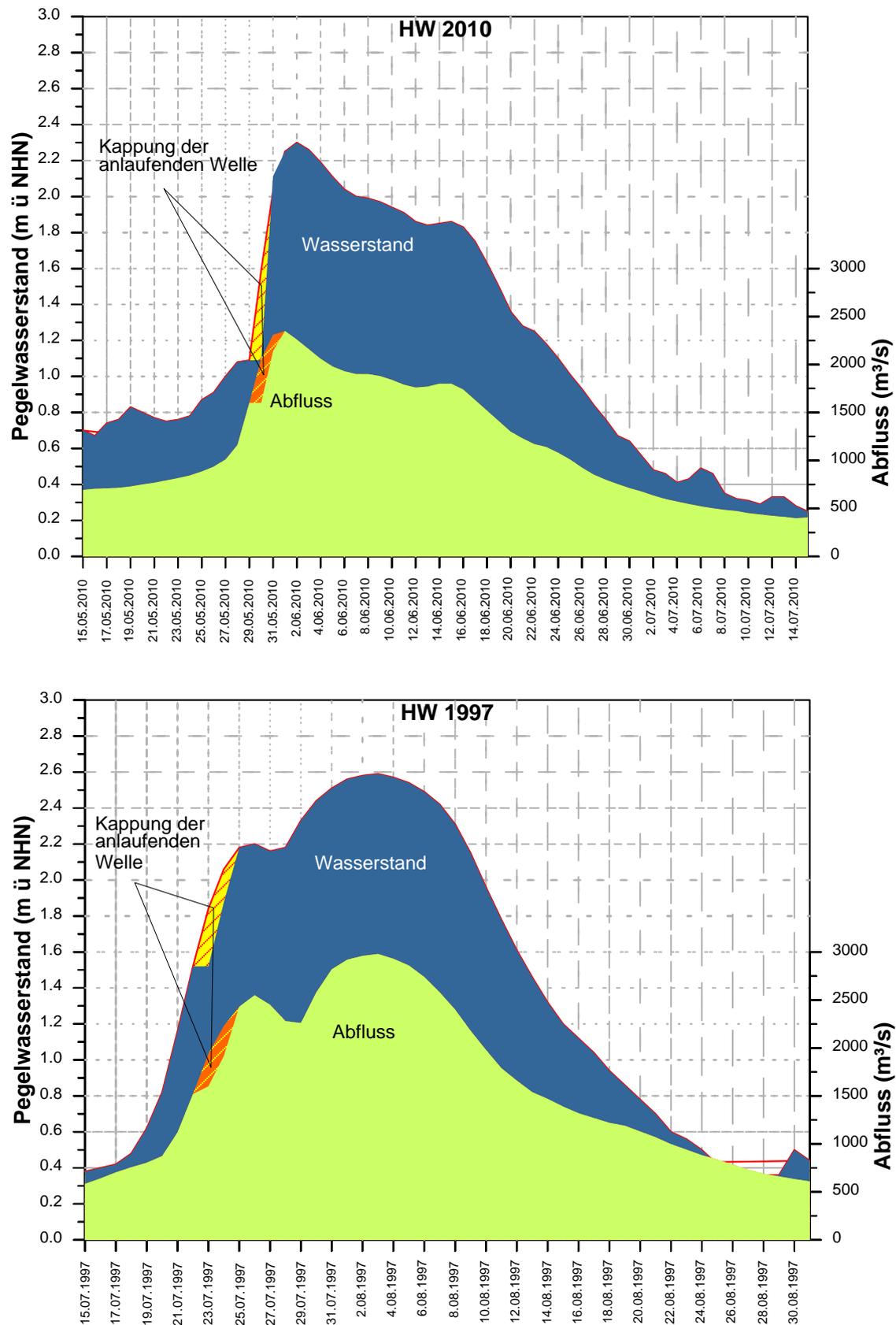


Abbildung 34: Wirkung eines Abschlags ab $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Poldervolumen von $54,3 \text{ Mio m}^3$ auf Abfluss und Wasserstand am Pegel Widuchowa exemplarisch für die HW 2010 und 1997 (Pegeldaten: /11/)

5.7 Auswirkungen eines Flutpolder-Ausbaus

Bei den ursprünglichen Planungen für den Polder vor dem Zweiten Weltkrieg wurden die Sommerdeiche um Międzyodrze so dimensioniert, dass die Fluttore bei einem Abfluss von $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ ansprangen. Bei extremeren Abflüssen konnten die Sommerdeiche frei überströmt werden. Unter $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ waren die Sommerdeiche neutral und erzeugten keine Wasserspiegelanhebung für die Oberlieger (Gramberg und Keil, 1938). Nur an den Autobahnbrücken der heutigen A6 (= A11 weiter westlich auf deutscher Seite) und der ehemaligen Reichsbahnstrecke Scheune - Altdamm (heute Szczecin - Gumieńce - Szczecin Dąbie) wurden hochwasserfreie Dämme vorgesehen (Ostmann und Keil, 1939). Dies war aufgrund der ausreichend großen Fließquerschnitte der West- und Ostoder im Bereich der Dämme möglich, die für ein maximales Bemessungshochwasser von $3.200 \text{ m}^3/\text{s}$ ohne Zuhilfenahme des Mittelpolders ausgelegt waren. Dabei sollten etwa $3/5$, also $1.920 \text{ m}^3/\text{s}$ durch die Große Reglitz (Ostoder) gehen und der Rest durch die Westoder (Abbildung 36c).

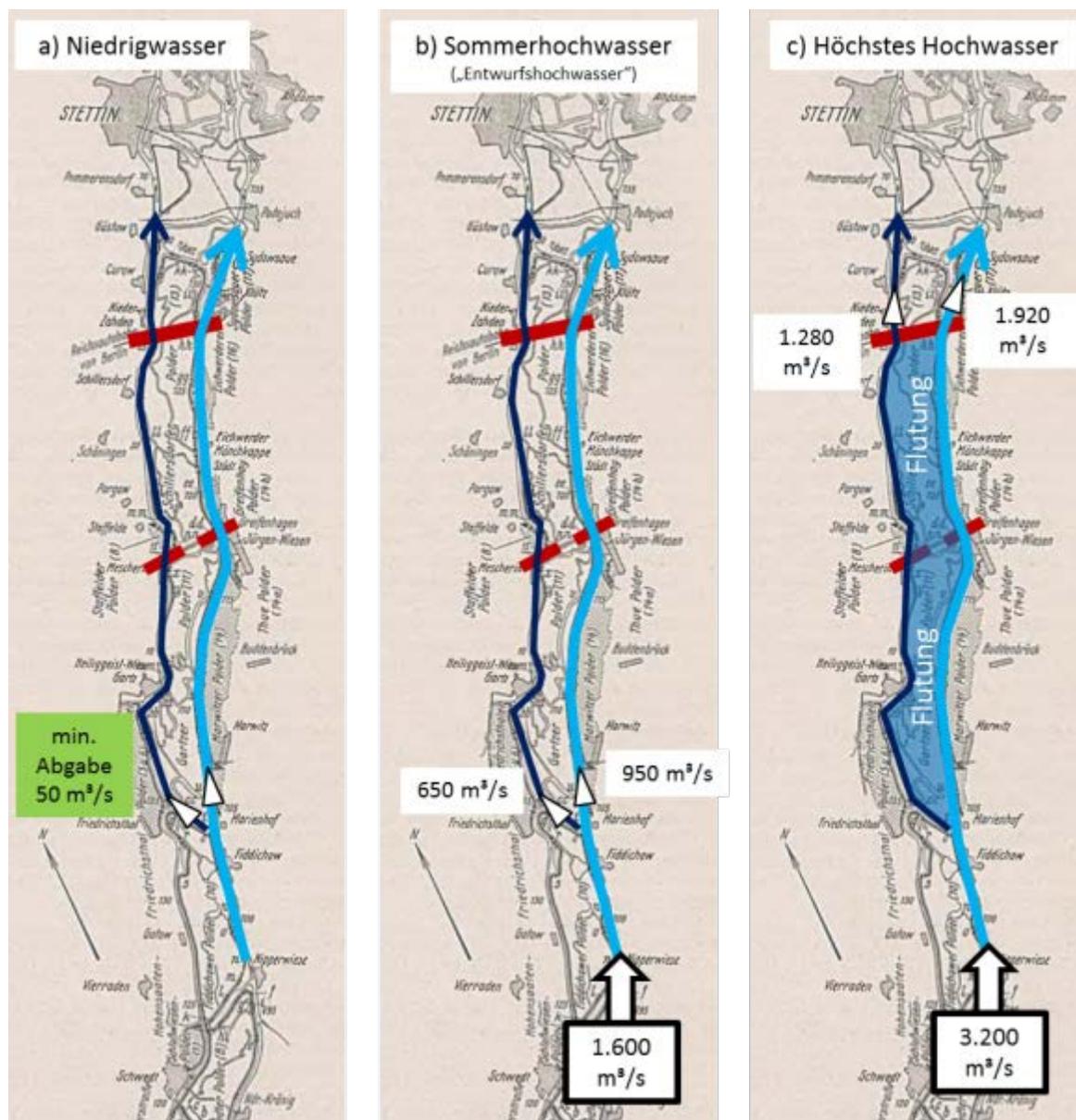


Abbildung 35: Historische Abflussaufteilungen und Bemessungsabflüsse in m^3/s für die drei betrachteten Bemessungsfälle mit Sommerdeichen (mod. aus Kieseritzky, 1938).

Erfolgt ein Ausbau von Międzyodrze nach dem historischen Vorbild mit niedrigen Sommerdeichen, die ab $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ erst durchströmt und bei größeren Abflüssen schließlich auf ganzer Länge überströmt werden, dann ist nur ein Schutz vor kleineren Hochwassern gegeben. Ein Schutz vor größeren Hochwasser-Ereignissen ist nicht möglich (vgl. Kapitel 5.5 und 5.6).

Eine Flutung erst über $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ erfordert einen größeren Ausbau des Flutpolders und höhere Trenndeiche um Międzyodrze als nach dem historischen Vorbild. Aufgrund des erhöhten Rückstaus sind zusätzlich Schutzmaßnahmen für die Oberlieger erforderlich, besonders der tiefer liegenden Flächen um Cedynia und im Oderbruch (vgl. Kapitel 5.6 und 5.7).

Hinzu kommen durch einen gesteuerten Flutpolder-Betrieb Veränderungen in der Dynamik des Hochwassergangs. Diese lassen sich verglichen mit dem Ist-Zustand als natürlicher Fließpolder wie folgt zusammenfassen (vgl. Abbildung 37):

- Der Flutpolder bleibt bis kurz vor Eintreffen des Hochwasserscheitels geschlossen. Damit steht für die anlaufende Welle des Hochwassers ein geringerer Fließquerschnitt zur Verfügung. Die Folgen sind, dass der Wasserspiegel bei anlaufender Welle schneller ansteigt und größeren Rückstau verursacht als im Fall eines offenen Fließpolders (Ist-Zustand).
- Mit der Öffnung der Fluttore und der gesteuerten Flutung des Polders wird Abfluss aus der Oder in den Polder abgeschlagen. Die Abflüsse der Oder verringern sich dadurch und der Wasserspiegel steigt langsamer an bzw. bleibt im Idealfall konstant.
- Nach Durchgang der Hochwasserwelle wird der Polder entleert. Gegenüber einem offenen Fließpolder entsteht dadurch eine etwas verzögerte ablaufende Welle (Abbildung 37).

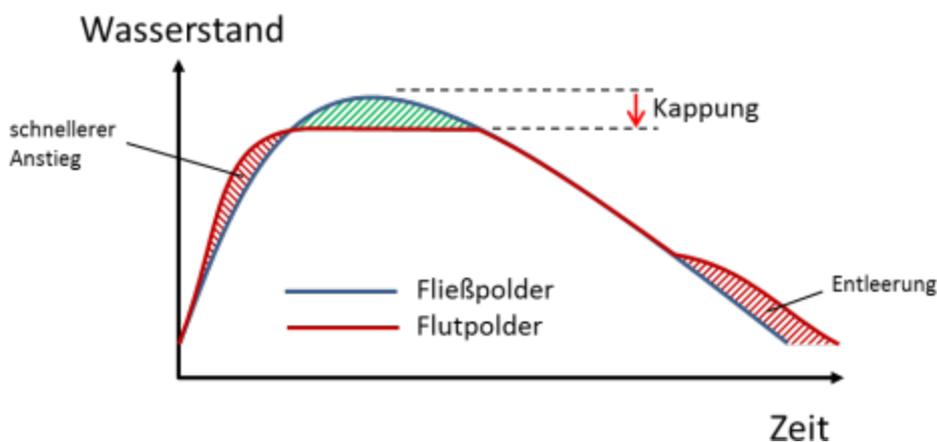


Abbildung 36: Vergleich der Ganglinien bei einem Fließpolder und gesteuerten Flutpolder

Wie in Kapitel 5.5 angemerkt, ist der bauliche Aufwand bei der Herstellung der Trenndeiche ein wesentlicher Faktor in der Kosten-Nutzen-Analyse. Je höher die Trenndeiche ausgeführt werden, desto höher sind die hydraulischen Druckgradienten und damit die Gefahr einer Durchströmung und Erosion bei Überströmung. Entsprechend höher sind die Baukosten.

5.7.1 Wirkung von Trenndeichen bei Eishochwasser

Die Errichtung von Trenndeichen (gemeint sind Sommerdeiche) und die Betriebsweise als gesteuerter Flutpolder hat auch Einfluss auf Eishochwasser, die einen ganz anderen Belastungsfall darstellen als Sommerhochwasser. Dabei müssen Eisbildung, Eisauflauf, Eisabtransport und Eisversatz sowie eine Dynamisierung der Wasserstandsganglinie berücksichtigt werden.

Trenndeiche schützen zunächst vor Überflutungen bei Wasserspiegelanstiegen infolge Eisversatz. Hierbei kann der Wasserstand innerhalb von 1 - 2 Tagen lokal um über 2 m ansteigen bzw. umgekehrt bei Eisauflauf durch die Eisbrecher auch genauso schnell absinken /6/. Die Belastung auf die Deiche ist durch die extreme Wasserspiegeldifferenz sowie damit verbundene Porenwasserüberdrücke und Sickerströmungen enorm. Hinzu kommen Deichschäden durch direkte Erosion infolge treibender Eisschollen bei Eisgang /6/. Trenndeiche müssen im Bereich von hydraulischen Engstellen konstruktiv auf diese erhöhten Belastungen ausgelegt sein und sind damit nur mit großem baulichen Aufwand zu realisieren.

Die Wasserstände im Fließquerschnitt steigen durch seitliche Trenndeiche schneller an und die Vorlaufzeit für Schutzmaßnahmen wird verringert. Eine Erhöhung der Trenndeiche bietet dabei grundsätzlich keinen zusätzlichen Schutz vor Eisversatz (Bervaes, 1990).

Werden Trenndeiche überströmt, nimmt der Abfluss im Hauptquerschnitt ab, was sich wieder ungünstig auf den Eisabtransport und die Stabilität der Eisdecke auswirkt. Eine Ausführung als überströmbare Deiche muss ebenfalls durch konstruktive Maßnahmen sichergestellt werden, durch Überlaufschwelle, Nachlaufsicherungen oder sehr flachen Böschungsneigungen, was zusätzlichen baulichen Aufwand erfordert.

Międzyodrze bietet im Ist-Zustand als offener und flacher Fließpolder Retentionsraum für Treibeis-schollen, die damit dem Hauptfließquerschnitt entzogen werden. Durch die geringe Strömung im Międzyodrze werden Eisschollen an Flachstellen abgesetzt und nicht weiter stromab transportiert. Die Rate und das Volumen des nach unterstrom abtransportierten Eises im Fluss reduzieren sich und verringern das Risiko weiteren Eisversatzes an Schlüsselstellen unterstrom.

5.7.2 Schlüsselstelle Marienhofer Wehr

Eisstand und Eisversatz bilden sich dort, wo oberflächennah Hindernisse bestehen, in Flusskrümmungen oder wenn das Gefälle abnimmt. Außerdem in Bereichen von Einengungen, Abschnitten mit langen tiefen Querschnitten oder an Flachstellen, an denen Treibeis auflanden kann (Beltaos, 1995).

Eine Schlüsselstelle für den Eisversatz um Międzyodrze ist das Marienhofer Wehr (Abbildung 38).

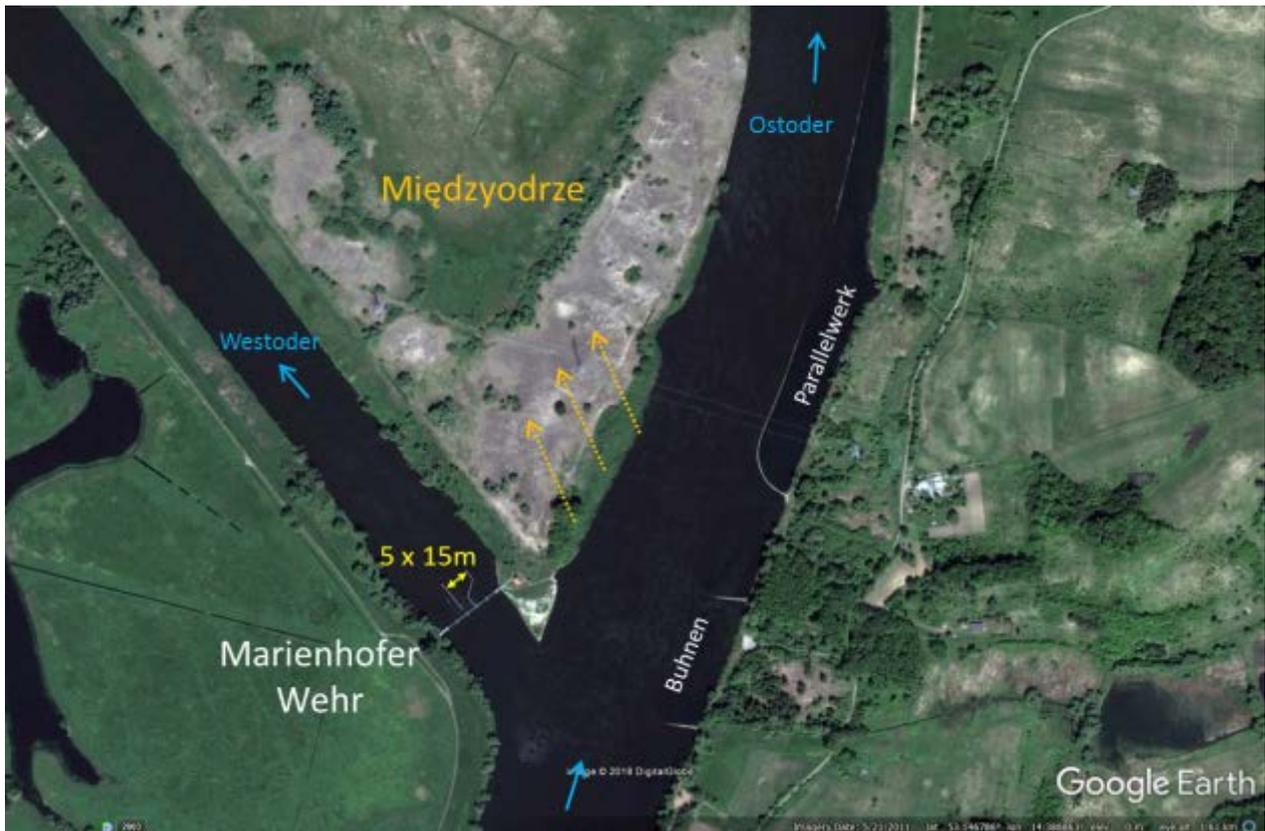


Abbildung 37: Marienhofer Wehr (google earth)

Das Marienhofer Wehr besteht aus 5 Wehrtafeln mit je 15,6 m lichter Weite und regelt die Abflussaufteilung zwischen Westoder und Ostoder. Aufgrund der geringen lichten Weite der Wehrfelder ist das Wehr für Treibeisschollen kaum durchgängig und es kommt regelmäßig zu Eisstau. Hinzu kommen Buhnen und ein langes Parallelwerk in der Ostoder, die sich beide ungünstig auf den Eisabtransport im Bereich der Aufzweigung auswirken (Hentschel und Höger, 2014).

In Abbildung 39 ist ein Eisstand im Januar 2009 dargestellt. Infolge des Eisstaus kommt es auch zum Eisversatz am Marienhofer Wehr, der eine Mächtigkeit von bis zu 3 m über den Wasserspiegel hinaus erreichen kann.

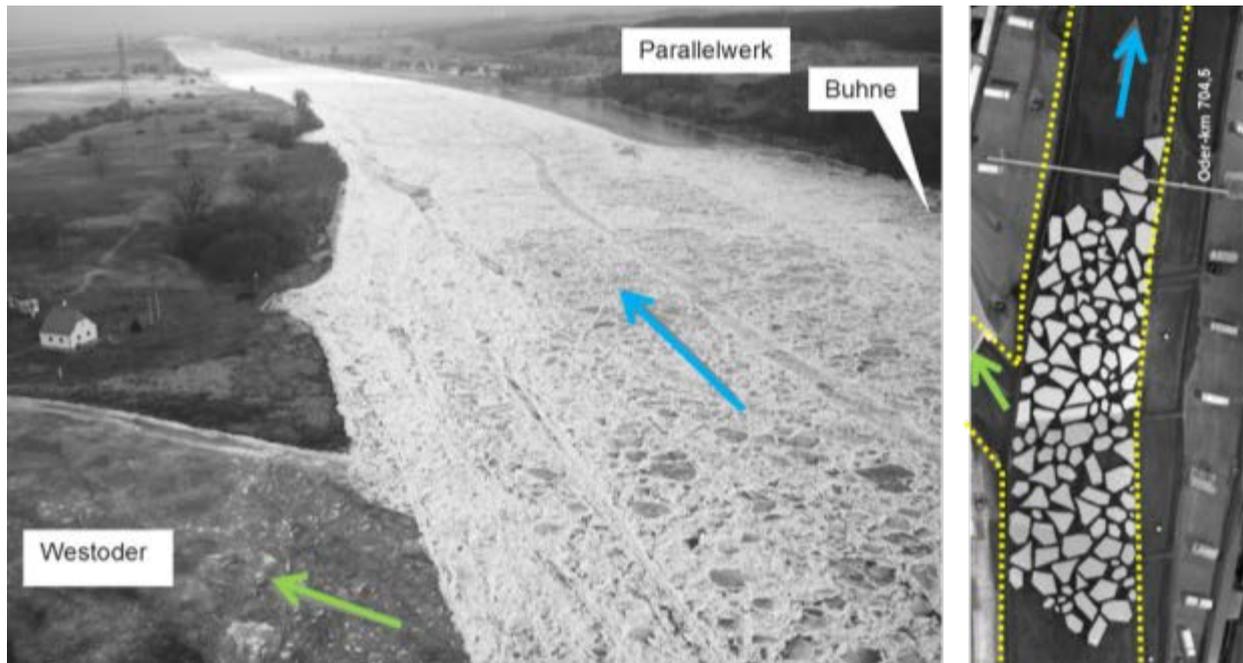


Abbildung 38: Eisstand am 26.01.2009 (Foto: Rent-a-drone) und Eisstau von Kunststoffschollen bei km 704,5 im physikalischen Labormodell der BAW (mod. aus Hentschel und Höger, 2014)



Abbildung 39: Eisversatz am Marienhofer Wehr am 23.12.2010 (Quelle: <http://rzgw.szczecin.pl/>)

Die BAW hat aus diesen Gründen im Auftrag des WSA Eberswalde an der Aufzweigung West- / Ostoder Laboruntersuchungen mit Kunststoffschollen durchgeführt (Aufnahme in Abbildung 39 rechts). Darin konnte für Niedrigwasserverhältnisse ($245 \text{ m}^3/\text{s}$) gezeigt werden, dass die Schließung des Marienhofer Wehres die Transportkapazität bis 2 km unterstrom deutlich erhöht. Durch den resultierenden geraderen Strömungsverlauf verbessert sich der Eisabtransport und das Risiko eines Eisversatzes sinkt. Von der BAW wurden auch Änderungen der Querschnittsgeometrie untersucht, die jedoch keine Auswirkungen auf die Transportkapazität hatten.

Die Ergebnisse der BAW zeigen grundsätzlich, dass eine Abflussentnahme aus dem Hauptstrom der Oder (hier: Ostoder) zu einer Verschlechterung der Situation bei Eisgang führt. Das Marienhofer Wehr entspricht dabei einer lokal konzentrierten Ausleitung mit entsprechend hohen oberflächennahen Fließgeschwindigkeiten und damit Eistransport. Hydraulisch ähnlich stellt

sich eine Abflusssenkung durch Fluttore eines gesteuerten Flutpolders mit Trenndeichen dar. Beim offenen Fließpolder wie im Ist-Zustand, erfolgt die Flutung früher und weitflächiger, wodurch eine lokale Strömungskonzentration weniger ausgeprägt ist. Damit sinkt die Gefahr einer Eisstandsbildung.

Falls Eisversatz am geöffneten Marienhofer Wehr und / oder an geöffneten Flutoren eintritt, würde es aufgrund des durch Trenndeiche eingeengten Abflussquerschnitts zu einem schnellen Wasserspiegelanstieg in der Ostoder kommen. Die Trenndeiche würden dann innerhalb kurzer Zeit überflutet werden. Dadurch besteht zusätzlich die Gefahr von Eisversatz an den Deichen und damit einem weiteren Wasserspiegelanstieg in der Oder - bis zum Versagen der Trenndeiche, die den enormen Belastungen unter diesen Bedingungen nicht standhalten könnten.

Der Ausbau vom natürlichen Fließpolder (Ist-Zustand) zum gesteuerten Flutpolder mit Flutoren und Trenndeichen führt damit zu einer Verschlechterung der Verhältnisse bei Eishochwasser. Wie bereits in den Kapiteln 5.6 und 5.7.1 erläutert, ist es darüber hinaus kaum möglich, die Trenndeiche konstruktiv so auszuführen, dass sie den Belastungen standhalten.

5.7.3 Schlüsselstellen an Brücken in der Unteren Oder

Weitere Schlüsselstellen für den Eisversatz sind die Engstellen an den Brücken über die West- und Ostoder (Abbildung 41). An Brücken muss zum einen die Einengung des Fließquerschnitts durch die Brückendämme (Brückenwiderlager) sowie die Stützweiten der Brückenpfeiler im Fließquerschnitt berücksichtigt werden. Je kleiner sie ausfallen, desto größer ist das Risiko eines Eisversatzes. Wichtigste Randbedingungen sind die Eisfracht, also die Masse an ankommendem Eis pro Zeiteinheit und pro Meter Flussbreite, die Schollengröße sowie die Strömungsverhältnisse um die Brücke. Hierzu gehören die Anströmung und die Nachlaufströmung, beispielsweise beeinflusst durch die Lage in einer Flusskrümmung, an Poldern, an Deicheinengung, oder im Bereich von Regelwerken oder Sandbänken /6/.



Abbildung 40: Brücken in West- und Ostoder als kritische Querschnitte für Eisversatz (google earth, Angaben der Stützweiten Gryfino - Mescherin nach Ostmann und Keil, 1939)

Grundsätzlich steigt mit zunehmender Eisschollenkonzentration und Schollengröße das Risiko eines Eisstaus an Brücken. Dieser Zusammenhang ist in dem einfachen Diagramm in Abbildung 42 dargestellt. Dabei wurde das Problem des Eisstaus an Brücken auf die Eisschollenkonzentration, d. h. die Bedeckung der Oberfläche mit Eis, und das Verhältnis von Eisschollengröße zu lichter Brückenweite als Eingangsparameter reduziert.

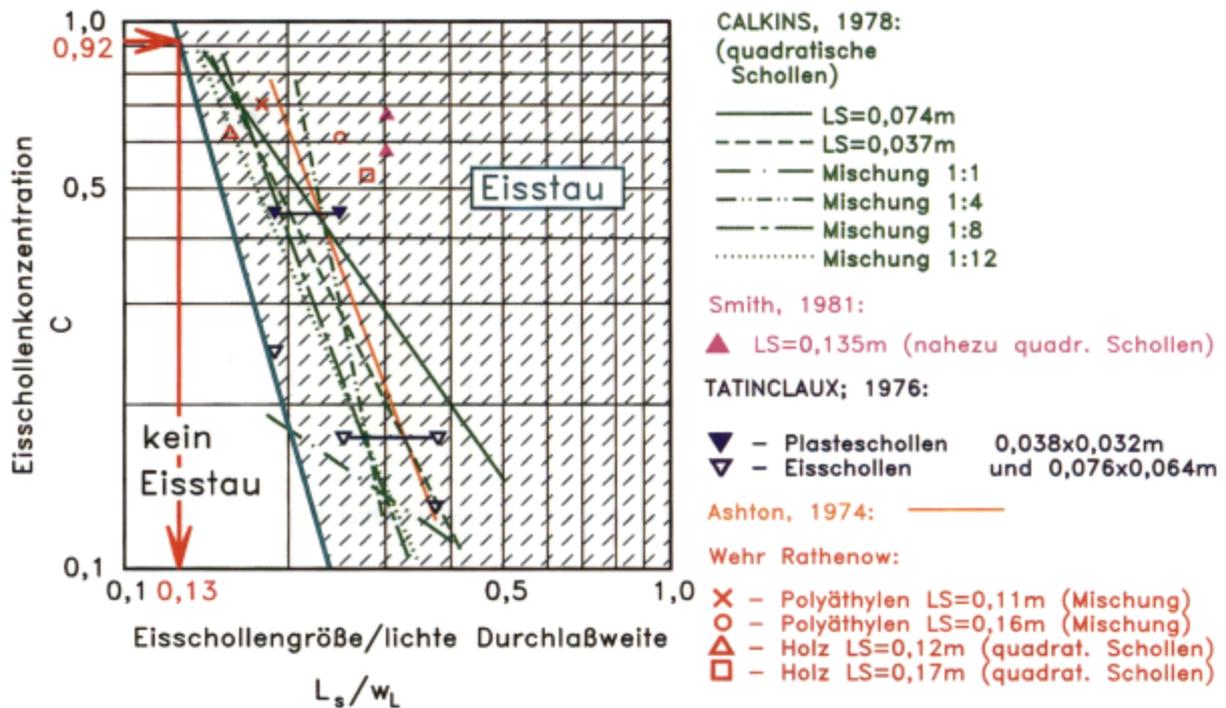


Abbildung 41: Eisstaugefahr an Brücken in Abhängigkeit von lichter Weite, Eisschollengröße und Eisschollenkonzentration (Alexy, 1998 in /6/)

Beispielsweise muss bei einer Eisschollenkonzentration von 0,92 (also 92% Bedeckung der Flussoberfläche mit Eisschollen) das Verhältnis Schollengröße zu lichter Brückenweite kleiner sein als 0,13, damit kein Eisstau eintritt. Bei einer lichten Weite von ca. 100 m, wie es an den Brücken der Ostoder der Fall ist, könnte demnach eine Schollengröße bis 13 m gefahrlos abgeführt werden. An den Brücken der Westoder wären aufgrund der geringeren lichten Weiten bereits Eisschollen ab 7,5 m kritisch für einen Eisstau.

Eine Reduktion der Eisfracht in der West- und Ostoder durch Retention von Eisschollen im Międzyodrze ist daher in jedem Fall wünschenswert. Dazu sollte Międzyodrze schon bei möglichst geringen Abflüssen, wie sie während des Eisauflaufs eintreten, weitflächig geflutet und durchströmt werden.

Für die Brücken über die Ostoder ist eine Entlastung in Zukunft besonders wichtig. Durch Modernisierungen des Kohlekraftwerks in Gryfino konnten die Warmwassereinleitungen reduziert werden. Damit ist in Zukunft mit einer früheren Eisbildung und dickeren Eisdecken im Bereich der gesamten Ostoder zu rechnen. Beim Eisauflauf wirkt sich die verringerte Wassertemperatur negativ aus, da sie ein Abtauen der Eisschollen verzögert und das Risiko eines Eisstaus damit im Bereich der gesamten Ostoder erhöht. Durch den Bau von Trenndeichen und den Verlust von Międzyodrze als Retentionsraum für Eisschollen (wie im Ist-Zustand), wird dieses Risiko zusätzlich erhöht.

5.8 Einschätzung des Hochwasserschutzkonzepts Międzyodrze-Ausbau

Die hydraulischen Verhältnisse im Bereich des Międzyodrze-Polders sind nicht allein vom Abfluss in der Oder abhängig, sondern auch vom Wasserstand im Dammschen See. Dieser wiederum wird von den Verhältnissen im Stettiner Haff und der Ostsee bestimmt. Der Einfluss von Wind und Windstau spielt demgegenüber im Dammschen See und in der Oder kaum eine Rolle.

Der Wasserspiegel im Bereich Międzyodrze hat daher die Form einer Staukurve, die asymptotisch zwischen der geneigten Wasserspiegellage der freifließenden Oder und dem praktisch horizontalen Seewasserstand (Dammscher See) verläuft. Durch die Staukurve sind beide Wasserkörper hydraulisch gekoppelt. Beispielsweise verursacht eine Erhöhung des Seewasserstandes eine Verringerung des Abflussvermögens der Oder. Physikalisch gesehen steht der Strömung in der Oder damit weniger Höhenunterschied und damit auch weniger Energie zur Verfügung.

Bereits im derzeitigen Zustand, d. h. ohne weitere Maßnahmen, funktioniert Międzyodrze als natürlicher Retentionsraum wie ein Fließpolder der bei Hochwasser durchströmt wird. Die hydraulische Wirkung ist dabei primär die Vergrößerung des Fließquerschnitts der Oder. Diese bewirkt eine Verringerung der Wasserstände bei einem Hochwasser gegenüber der Situation, in der Międzyodrze nicht durchströmt würde. Der größere Fließquerschnitt beeinflusst auch die Situation bei Eisgang positiv, da die Gefahr von Eisversetzungen an den Brücken verringert wird.

Mit dem geplanten Ausbau von Międzyodrze zum gesteuerten Flutpolder wird eine andere Strategie verfolgt, nämlich die Nutzung zur Scheitelkappung von Hochwasserwellen in der Oder. Am Referenzpegel Widuchowa sind die Abfluss- und Wasserstandsganglinien jedoch bereits stark abgeflacht, wie die Ereignisse 1997 und 2010 deutlich gemacht haben. Selbst ein optimal gesteuerter Betrieb als Flutpolder unter Ausnutzung des gesamten Poldervolumens würde daher nur eine Verringerung des Scheitelwasserstandes um wenige Zentimeter zwischen Widuchowa und Szczecin bewirken. Gleichzeitig ginge die jetzige Funktion als Fließpolder verloren und das Hochwasserrisiko für die Oberlieger würde aufgrund des erhöhten Rückstaus zunehmen. Auch bei Eishochwasser würde es durch erhöhte Trenndeiche zu einer Verschlechterung kommen, da die Eisfrachten im Hauptfließquerschnitt zunehmen und die Gefahr eines Eisversatzes an Brücken damit erhöht würde. In Summe würde sich damit die Hochwassersituation an der Unteren Oder durch den Flutpolderausbau und Trenndeiche verschlechtern.

Um eine Verbesserung der Hochwassersituation der Unteren Oder zu erreichen, müssen Maßnahmen auf eine Verringerung der Wasserstände im Dammschen See und damit verbunden auf einen Schutz vor dem Einfluss hoher Wasserstände im Stettiner Haff und damit schließlich der Ostsee, abzielen.

Eine Verbesserung der bereits bestehenden Funktion als Fließpolder ist durch die Schaffung von Durchlässen im Autobahndamm der A6 (= A11 weiter westlich auf deutscher Seite) möglich und weiter zu untersuchen.

6 Stromregelungskonzeption des WSA Eberswalde

6.1 Veranlassung für die Stromregelungskonzeption

Grundlage der Stromregelungskonzeption und damit der BAW-Untersuchungen ist das „Thesenpapier für eine spätere rechtliche Regelung zur gemeinsamen Verbesserung der Situation an den Wasserstraßen im deutsch-polnischen Grenzgebiet (Hochwasserschutz, Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse)“ /16/. In diesem wurden die Überschreitungsdauern auf 80% oberhalb und 90% unterhalb der Warthemündung für eine mittlere Wassertiefe von 1,80 m festgelegt.

Ein zentraler Aspekt darin ist die Gewährleistung des Einsatzes von Eisbrechern zur Vermeidung von Eishochwassern. Die angegebenen Wassertiefen orientieren sich daher auch am Tiefgang der bestehenden Eisbrecherflotte der Oder: *„Dabei orientieren sich die anzustrebenden Wassertiefen an den **Erfordernissen des Eisbrechereinsatzes und sind möglichst zuverlässig zu gewährleisten.**“* [/1/, S. 24].

Tabelle 11: Deutsche Oder-Eisbrecherflotte (Pressemitteilung WSA Eberswalde vom 05.01.2011)

Name	Fahrzeugtyp	Länge / Breite in m	Tiefgang min / max in m	Leistung in 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

Der Tiefgang im Betrieb liegt dabei zwischen minimalem und maximalem Tiefgang zuzüglich 0,2 m Absunk im Heckbereich (Angabe zu Eisbrechern der Elbe aus Presseauskunft des WSA Lauenburg, 2013). Die schiffbauliche Konstruktion der Eisbrecher gibt in der Stromregelungskonzeption somit das flussbauliche Ausbauziel der Oder vor.

Da die Eisbrecher über die gesamte Flussbreite navigieren müssen, ist die mittlere Wassertiefe entscheidend (siehe auch Kapitel 6.2). Diese wird als Bemessungsmaß für die Schiffbarkeit in der SRK verwendet: *„Darüber hinaus bewegen sich die Eisbrecher beim Eisauflauf nicht in einer eng begrenzten Fahrrinne sondern im gesamten Bereich zwischen den Ufern. Daher ist für das primäre Ziel, ausreichende Tiefen für den Eisauflauf zu gewährleisten, die Betrachtung einer schmalen Fahrrinne irrelevant.“* [/1/, S. 81].

Verhältnisse bei Eisgang wurden von der BAW nicht untersucht: *„Für den Einsatz der Eisbrecher können Fahrinnenverläufe allerdings nicht untersucht werden, da sich die Sohle der Oder unter einer geschlossenen Eisdecke ganz anders ausbilden wird, als es in dem Modell der Fall ist. Über die Form der Sohle und die Bewegung von Dünen unter Eis an der Oder liegen derzeit noch keine Erkenntnisse vor, so dass diese auch nicht modelliert werden können.“* [/1/, S. 79]

Allerdings ist nicht belegt, dass Eisbrecher überhaupt Schwierigkeiten mit Flachstellen haben. Hierzu antwortete die Brandenburger Landesregierung (MLUL) auf die Kleine Anfrage Nr. 1839: „Aus den vergangenen Jahren sind keine Fälle bekannt, in denen ein Eisbrechereinsatz aus den genannten Gründen [mangelnde Schifffbarkeit oder wegen Untiefen] gescheitert ist.“ [Frage 11 in Drucksache Landtag Brandenburg 6/4619]. Damit ist die Grundthese für die Umsetzung der Stromregelungskonzeption bei derzeitigem Kenntnisstand rein hypothetisch.

6.2 Definition der mittleren Wassertiefe

Die Wassertiefe ergibt sich aus der Sohlenlage und dem Wasserstand. Aufgrund der unregelmäßigen Struktur der Odersohle mit überlagerten Transportkörpern wurde in der SRK mit abschnittswisen Mittelwerten gearbeitet. Dazu heißt es in der SRK: „Die Arbeit mit der mittleren Wassertiefe ist erforderlich, da es aufgrund der sehr komplexen und hoch dynamischen Verhältnisse an der Sohle der Oder nicht möglich ist, auf der Grundlage theoretischer Betrachtungen eine für die Schifffahrt nutzbare Tiefe in einer Fahrrinne auszuweisen.“ [1/, S. 5]

Die BAW-Studie verwendet das Ersatztrapezprofil als Mittelung der Wassertiefe (siehe Kapitel 6.1). Die Wassertiefe wird dabei über eine Grundfläche gemittelt, d. h. über den Querschnitt und in Längsrichtung. Dabei werden Transportkörper und lokale Kolke / Erosionsstellen in eine gleichmäßige Sohlenänderung des Querprofils umgerechnet (Abbildung 43).

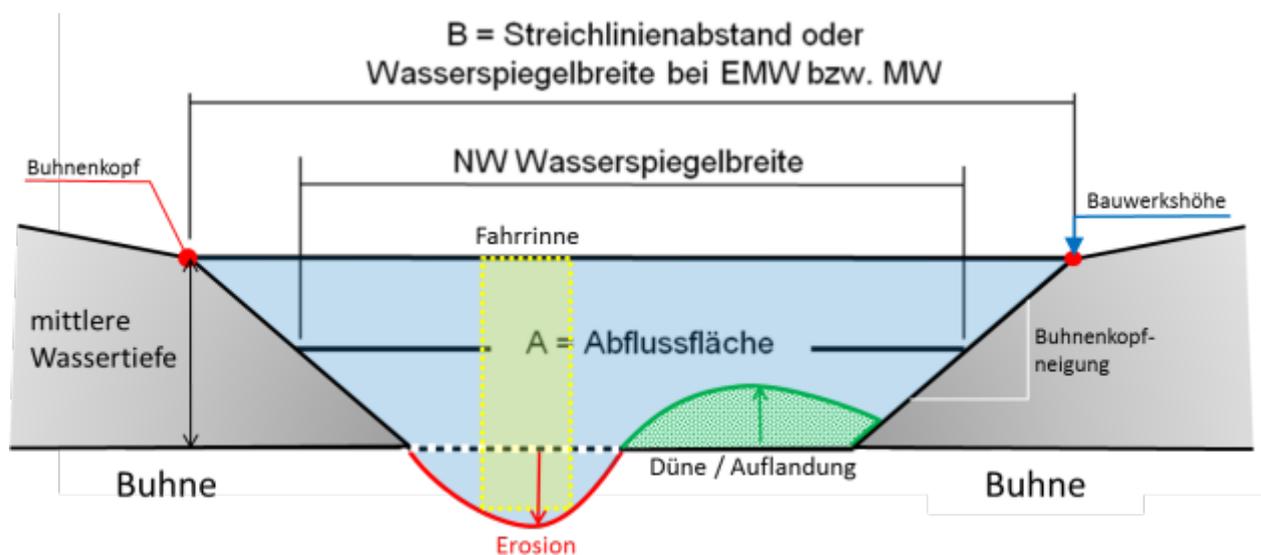


Abbildung 42: Definition der mittleren Wassertiefe und Fahrrintentiefe im Querschnitt (mod. aus [1/])

Die Definition einer Flachstelle in der SRK bezieht sich daher auch immer auf einen größeren Flächenabschnitt der Odersohle, der mindestens dem Quadrat der Flussbreite entspricht. Alternerende Sandbänke oder asymmetrische Querschnitte wie in Krümmungen werden bei dieser Methode „ausgemittelt“.

6.3 Methodische Vorgehensweise der BAW

Die Untersuchungen der BAW „[...] konzentrieren sich daher im Wesentlichen auf die Erarbeitung von neuen Regelungsgrundsätzen für eine Modifikation des vorhandenen Ausbauszustands der Grenzoder.“ [1/, S. 25]. Die betrachteten Regelungsvarianten umfassen die Vereinheitlichung, Instandsetzung und Modifikation der Buhnen zwischen km 540 und 682. Streckenweise entspricht das Maß der Modifikation aber einem erheblichen technischen Ausbau der Buhnen. Dabei wurden Varianten der geometrischen Parameter Streichlinienabstand und Bauwerks(soll)höhe betrachtet (vgl. Abbildung 43).

Die BAW hat für ihre Untersuchungen auf Grundlage von Naturdaten ein Modellsystem für die Grenzoder entwickelt. Es umfasst ein physikalisches Labormodell des Abschnitts bei Hohenwutzen und ein numerisches Strömungs- und Feststofftransportmodell (1D-FTM) für die gesamte Grenzoder.

Die hydraulische Kalibrierung des Modellsystems erfolgte mit gemessenen Wasserspiegellagen für verschiedene Abflüsse. Die Kalibrierung erzielt dabei die geringste mittlere Abweichung bei Niedrigwasserabflüssen, doch treten lokal Abweichungen bis 0,20 m auf (Abbildung 44). In dieser Größenordnung liegen auch die Abweichungen bei höheren Abflüssen, die bei Hochwasser bis über 0,30 m betragen (km 640 / 658). Hier zeigt sich, dass die Überlagerung von Rauheitseinflüssen in der Oder und eine abflussvariable Dünengeometrie der Modellierung doch noch erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

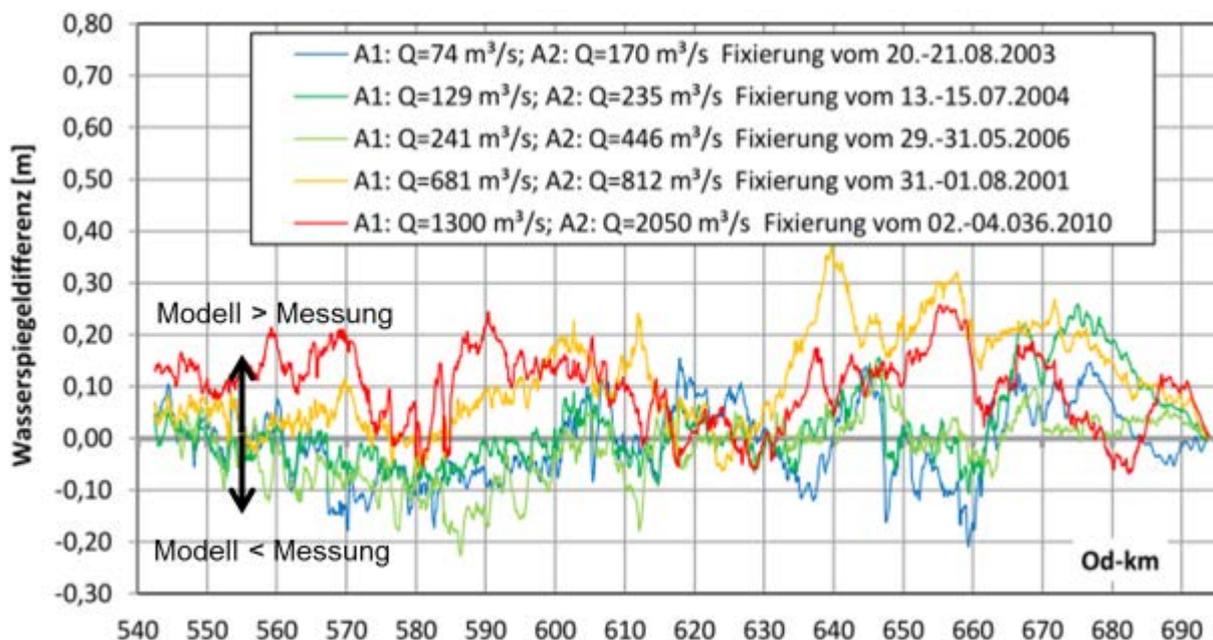


Abbildung 43: Abflussabhängige Differenz berechneter und gemessener Wasserspiegel (aus [1/])

So wird in der SRK auch festgehalten, dass die morphologische Kalibrierung in 1D-FTM erheblich schwieriger war und wegen der unzureichenden Datengrundlage mit vielen Annahmen durchgeführt werden musste [1/, S. 39 ff.]. Der Feststoffeintrag im Modell musste dazu so lange kalibriert und angepasst werden, bis die mittlere Sohlenhöhe keine weitere Aufhöhung oder Erosion mehr aufwies (in der SRK der „morphologische Gleichgewichtszustand“).

Eine besonders große Unsicherheit stellen dabei die Sedimenteinträge aus der Warthe dar, über die kaum Informationen vorliegen. Hierzu heißt es in der SRK: „Abgesehen von 2 Einzelmessungen [...] liegen keinerlei Daten für den Feststoffeintrag der Warthe vor.“ [1/, S. 70]. Dass diese unbekannte Einflussgröße sich ganz erheblich auf die Ergebnisse auswirkt, wird in der SRK direkt angesprochen: „Im Zuge der Modellkalibrierung wurde eine besondere Sensitivität der Odersohle auf den Geschiebeeintrag der Warthe festgestellt.“ [1/, S. 70]. Daran anschließend wird argumentiert, dass „[...] in Bezug zu Aussagen über die grundlegende Wirkung der Varianten und deren Einordnung eine belastbare Prognose dennoch möglich [ist].“ [1/, S. 72].

Zusammengefasst bedeutet dies, dass vergleichende qualitative Aussagen zwischen den Varianten getroffen werden konnten. Eine Quantifizierung konnte aufgrund der Datenlücken im Bereich der Warthemündung und ihrer Auswirkung auf den Abschnitt unterhalb jedoch nur mit großen Unsicherheiten erfolgen.

Die Berechnungen der mittleren Sohlenlage erfolgten mit 1D-FTM für 40 Jahre in die Zukunft. Für den Prognosezeitraum wurde zunächst die Abflussganglinie der Daten 1981 - 2010 verwendet und der Zeitraum 1981 - 1990 darin am Ende nochmals wiederholt (Abbildung 45). Das HW 2010 und besonders das HW 1997, das als größtes Ereignis der letzten 100 Jahre gilt, sind darin enthalten.

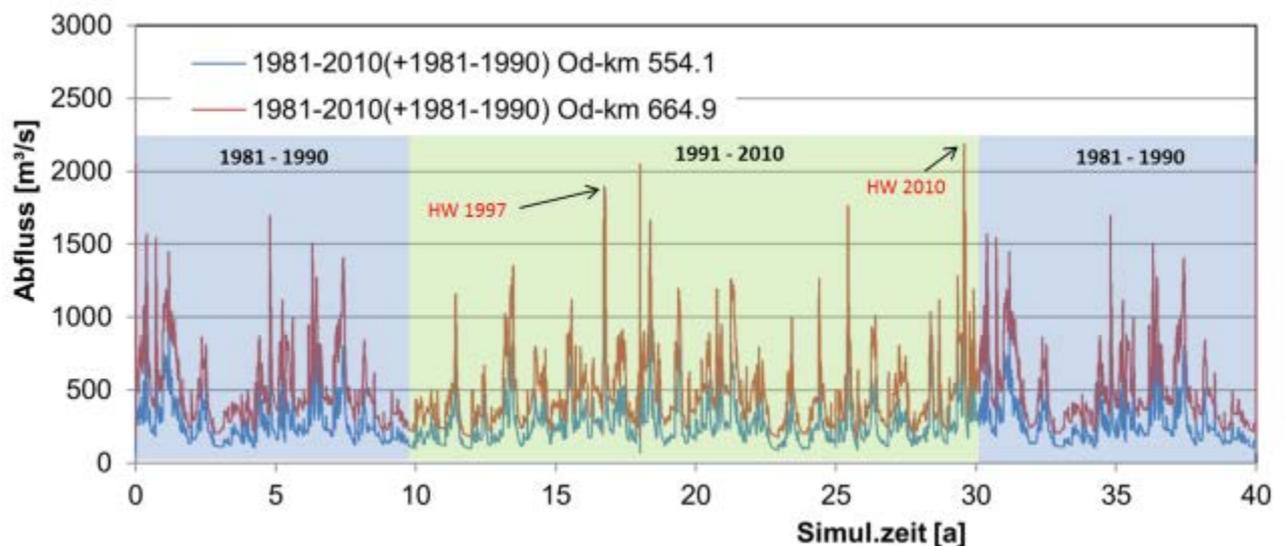


Abbildung 44: Vorläufige Abflussganglinie für die Prognoseberechnungen von 40 Jahren, die für die Vorzugsvariante SRK-V5 angesetzt wurde (mod. aus [1/ Bild 5-5)

Erst 2012 lagen weitere Pegeldata vor: „Die Daten für den gesamten Zeitraum von 1971 bis 2010 lagen Mitte 2012 vor, so dass die Variante V0, SRK-V1 (SRK = Stromregelungskonzeption) und die Variante SRK-V4 neben den Berechnungen mit der zusammen gesetzten Zeitreihe auch mit der vollständigen Zeitreihe von 1971 bis 2010 durchgeführt wurden.“ [1/, S. 47]

6.4 Vorzugsvariante der BAW

Die Vorzugsvariante SRK-V5, die von der BAW zur Umsetzung empfohlen wurde, umfasst die in Tabelle 12 zusammengestellten Maßnahmen. Der Entwurfmittelwasserstand EMW_{2010} ist dabei der Bemessungswasserstand auf Grundlage der Jahresreihe 1981 - 2010 für einen Abfluss von $300 \text{ m}^3/\text{s}$ oberhalb der Warthe und $500 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Maßnahmen der BAW-Vorzugsvariante SRK-V5 (Quelle: /1/)

Oder-km	Maßnahme BAW SRK-V5
gesamt	Vereinheitlichung und Instandsetzung der Bühnen
542 - 585	Vergrößerung der Streichlinienabstände auf 126 m Abflachung Bühnenkopfneigung auf 1:10
585 - 618	Verringerung der Streichlinienabstände auf 126 m Abflachung der Bühnenkopfneigung auf 1:10
618 - 662	Verringerung der Streichlinienabstände auf einheitliche 172 m
662 - 682	Vergrößerung der Streichlinienabstände auf 186 m
540 - 618	Sollhöhe der Bühnenköpfe auf dem Niveau EMW_{2010}
618 - 625	schrittweise Anpassung der Sollhöhe von EMW_{2010} auf EMW_{2010} minus 0,5 m
625 - 682	Sollhöhe der Bühnenköpfe auf EMW_{2010} minus 0,5 m

Was die Maßnahmen gegenüber dem Ist-Zustand konkret bedeuten, wird in Abbildung 46 deutlich. Zwischen km 620 und 662 müssen die Bühnen um bis zu 100 m verlängert werden, um den Streichlinienabstand von 172 m einzuhalten. Dies würde einen massiven Eingriff in die Oder bedeuten.

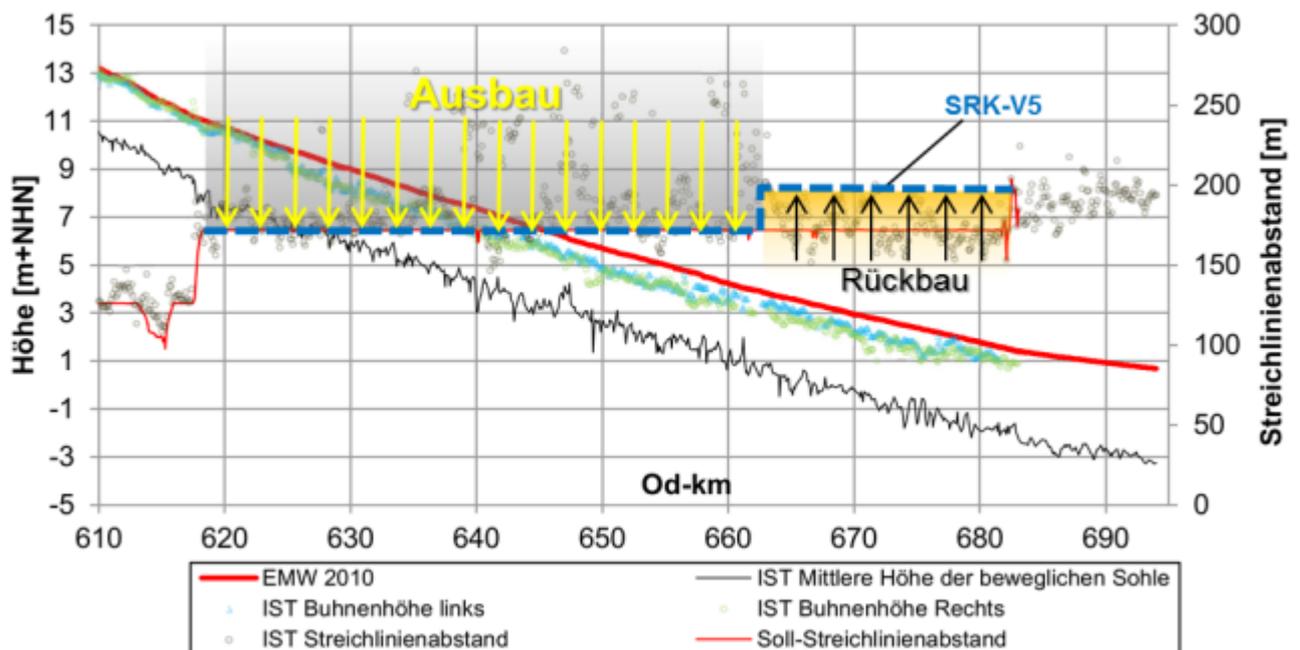


Abbildung 45: Streichlinienabstände und Bühnenhöhen (IST / Soll nach SRK-V5) im Abschnitt 2 (mod. aus /1/)

6.4.1 Wirkung der Vorzugsvariante SRK-V5

Um die Wirkung der Regulationsmaßnahmen zu beurteilen, muss sowohl die Veränderung der mittleren Sohlenlage (Erosion oder Auflandung) als auch die Veränderung der Wasserspiegelhöhe berücksichtigt werden. Aus der Summe beider Anteile ergibt sich die Veränderung der mittleren Wassertiefe.

In Abbildung 47 ist der Prognosezustand des Modells 1D-FTM nach 40 Jahren für die Variante V4, die Vorzugsvariante V5 und ohne Maßnahmen (V0) dargestellt. Der Längsschnitt zeigt die mittlere Wassertiefe entlang des gesamten Untersuchungsabschnittes und Flachstellen als Spitzen.

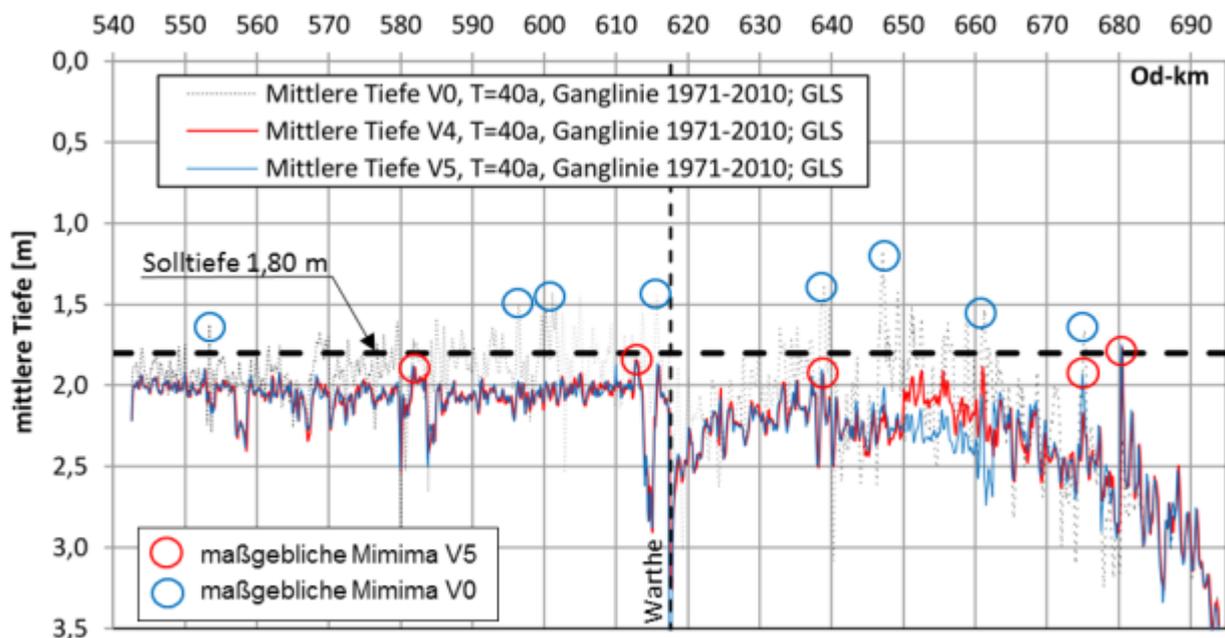


Abbildung 46: Mittlere Wassertiefe für den Prognosezustand nach 40 Jahren ohne Maßnahmen (V0) und mit Umsetzung der Vorzugsvariante (V5). Die Wassertiefe bezieht sich auf den $Q_{P\ddot{u}80}$ bzw. $Q_{P\ddot{u}90}$ (Bild 6-77 mod. aus /1/)

Hierbei wird deutlich, dass die Flachstellen maßgeblich für die SRK sind. Die mittlere Sohlenlage wird in der SRK durchgängig so weit abgesenkt, bis auch an den Flachstellen die Solltiefe von 1,80 m erreicht wird. Die Varianten V5 und V4 erreichen dieses Ziel für den Prognosezustand. Durch den durchgängigen Ausbau wird – mit Ausnahme der Flachstellen – die Wassertiefe entlang der gesamten Grenzoder über das erforderliche Maß von 1,80 m hinaus erhöht. Das Konzept eines durchgängigen Ausbaus ist damit unverhältnismäßig und unwirtschaftlich.

Der Anteil, der durch Sohlenerosion an Wassertiefe zugewonnen wird, ist in Abbildung 48 für die Grenzoder unterhalb der Warthemündung aufgeteilt in drei Abschnitte dargestellt. Daten der Vorzugsvariante V5 sind darin nicht abgebildet, sodass hier ein Vergleich über Variante V4 erfolgen muss, die nur zwischen km 650 bis 663 abweicht und dort um ca. 0,2 m geringere mittlere Tiefen aufweist (vgl. Abbildung 47).

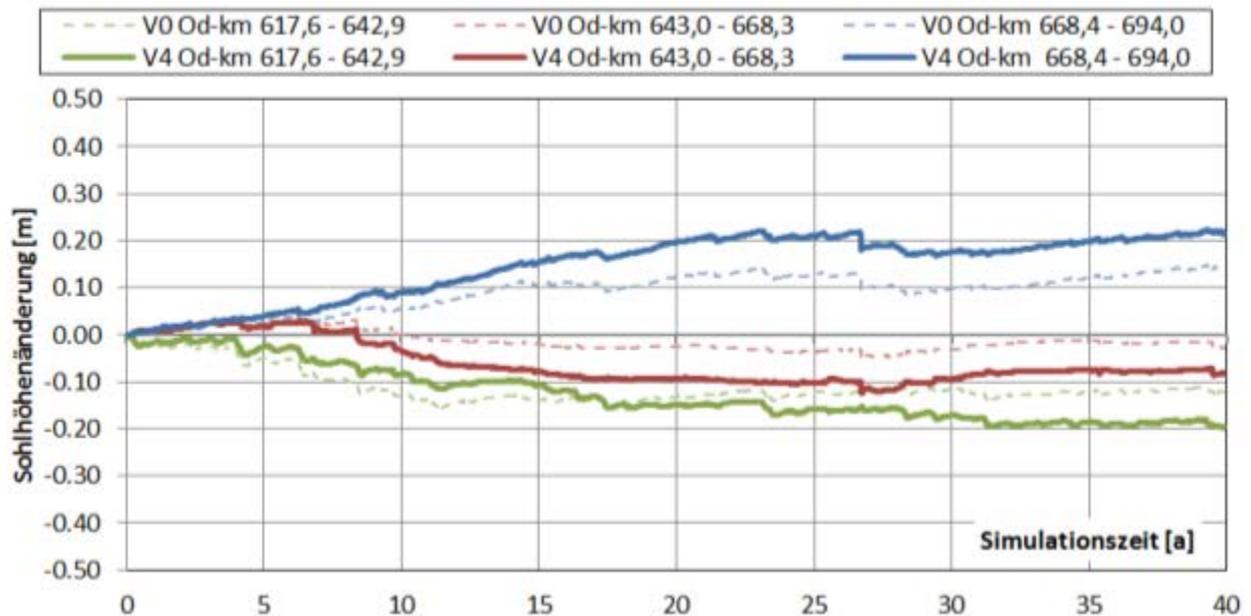


Abbildung 47: Mit 1D-FTM prognostizierte Sohlhöhenentwicklung unterhalb der Warthemündung ohne SRK-Maßnahmen (V0) und mit Umsetzung der Variante V4 (Bild 6-71 aus /1/)

Nur für den untersten Abschnitt der Grenzoder bei km 668,4 - 694,0 prognostiziert das Modell eine Aufhöhung, die nach 40 Jahren etwa 0,2 m beträgt (also 5 mm/Jahr). In den anderen Abschnitten kommt es dagegen zu Erosion. Unterhalb der Warthemündung bei km 617,6 beträgt diese 0,1 - 0,2 m (2 - 5 mm/Jahr).

Die Prognose der Entwicklung ohne SRK-Maßnahmen (V0) zeigt die gleiche Tendenz der Sohlenentwicklung mit Erosion im oberen und Aufhöhung nur im untersten Abschnitt. Der mittlere Abschnitt bleibt weitgehend stabil und ist im morphologischen Gleichgewicht. Die Beträge der Sohlhöhenänderung sind jedoch um 30 – 50% geringer als bei Umsetzung der Variante V4 und liegen unter 0,4 mm/Jahr. Die Belastbarkeit der Prognosen muss dabei natürlich vor dem Hintergrund der Modellunsicherheiten und insbesondere der kaum erfassten Einträge aus der Warthe betrachtet werden.

Verglichen mit der Entwicklung der Odersohe in den letzten 50 Jahren (Kapitel 4.1) ist die Prognose einer Tendenz zur Eintiefung zwischen Warthemündung bis unterhalb Hohenwutzen auch ohne SRK-Maßnahmen doch überraschend. Eine Tendenz zur Aufhöhung besteht in den Modellberechnungen nur noch im unteren Abschnitt (ab km 668), der ohnehin schon ausreichende Wassertiefen aufweist und damit keiner flussbaulichen Regelung zur Gewährleistung der Mindestwassertiefe bedarf.

6.4.2 Hochwasserwirkung der Vorzugsvariante SRK-V5

Die SRK wurde mit Fokus auf Mittelwasserverhältnisse entwickelt, also für 300 m³/s oberhalb und 500 m³/s unterhalb der Warthe. Die Maßnahmen wurden so entwickelt, dass sie besonders wirksam bei Mittelwasser und damit bei Eishochwassern im Winter sind. Von der BAW wurden aber auch ergänzende Berechnungen zur Wirkung bei Niedrig- und Hochwasserabflüssen durchgeführt. Die Ergebnisse sind abschnittsbezogen in Abbildung 49 dargestellt.

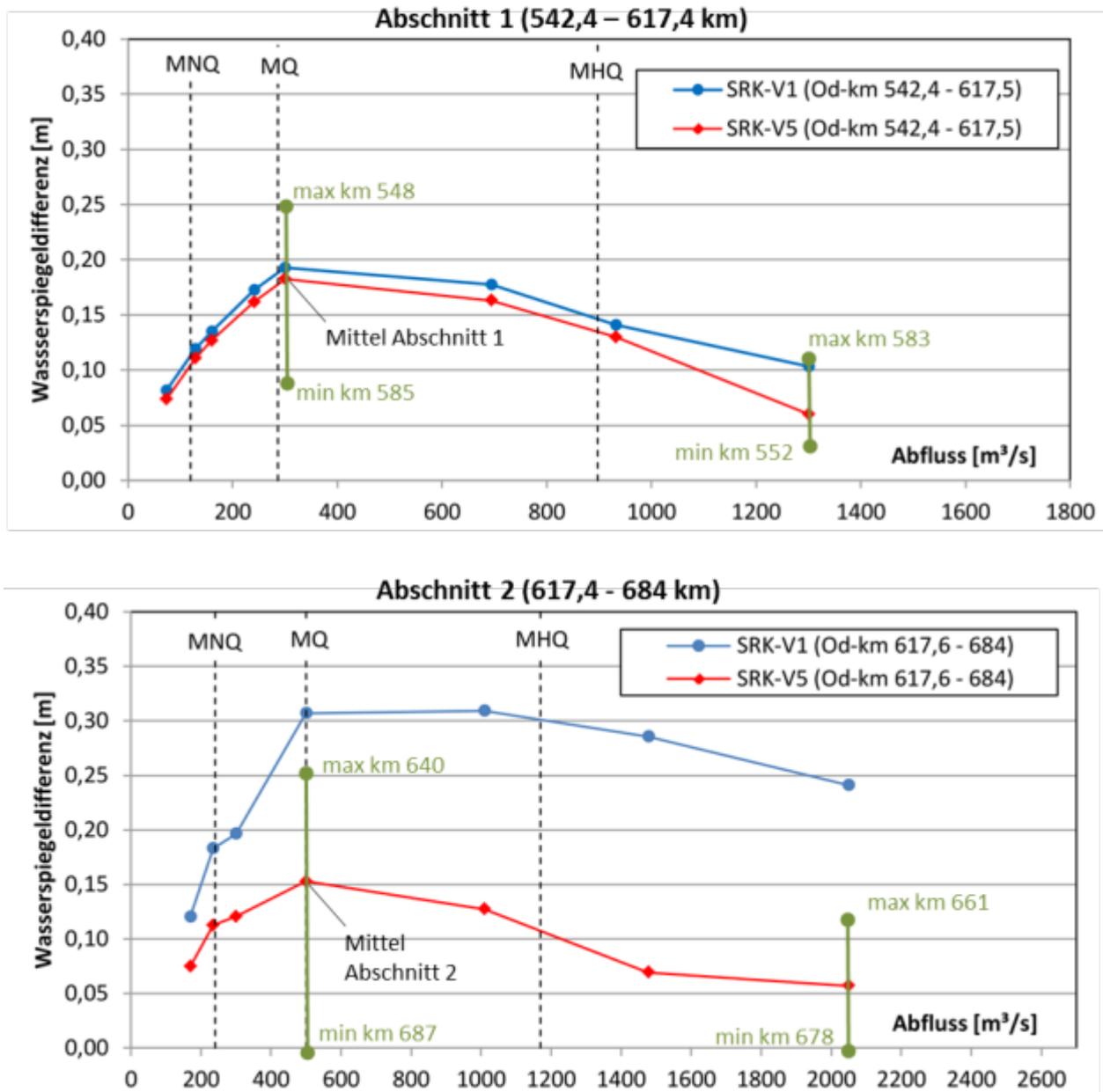


Abbildung 48: Auswirkungen der Vorzugsvariante SRK-V5 auf die Wasserspiegeländerung als abflussabhängige Mittelwerte über die beiden Abschnitte. Grüne Balken stellen das lokale Maximum und Minimum der Abweichung dar und den Fluss-km, an dem sie auftreten (mod. aus /1/)

Der Ausbau der Bühnen führt demzufolge auch bei kleineren und größeren Abflüssen als Mittelwasserabfluss zu einer Anhebung der Wasserstände. Bei Niedrigwasser ist diese Wirkung als positiv zu werten, bei Hochwasserabflüssen mit $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ oberhalb und $2.050 \text{ m}^3/\text{s}$ unterhalb der Warthe (d. h. etwa zwischen HQ_5 und HQ_{10}) besteht durch die $0,05 - 0,06 \text{ m}$ Wasserspiegelanstieg durch die SRK-Vorzugsvariante V5 jedoch eine Verschärfung des Hochwasserrisikos.

Lokal treten bei Hochwasser sogar noch größere Wasserspiegelerhöhungen auf, wie in Abbildung 50 dargestellt ist. Die maximale Wasserspiegelerhöhung durch die SRK-Maßnahmen der Vorzugsvariante V5 beträgt darin 0,12 m bei Oder-km 661.

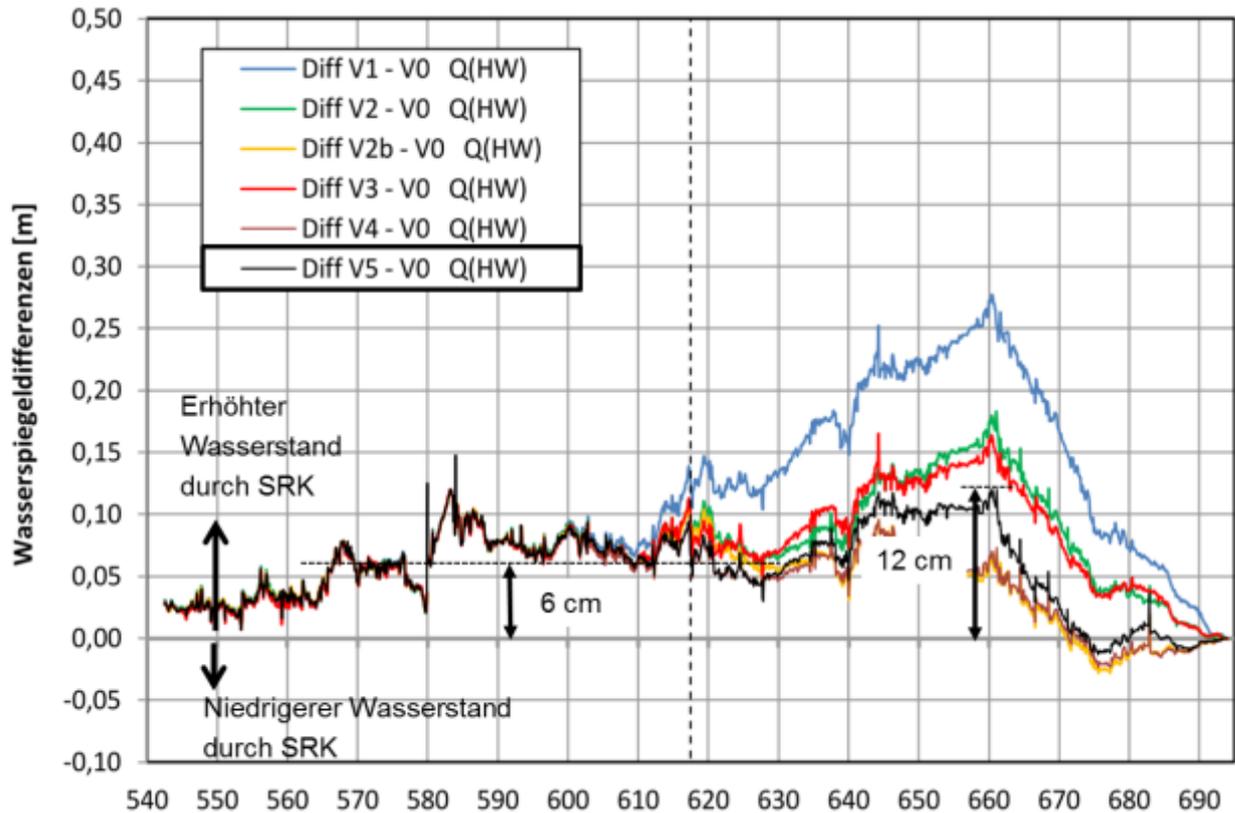


Abbildung 49: Änderung in der Wasserspiegellage durch Umsetzung der SRK-Varianten nach 40 Jahren und bei einem mittleren Hochwasserabfluss, ca. HQ₅ bis HQ₁₀ (mod. aus /1/)

Für noch größere HW-Ereignisse als HQ₅₋₁₀ heißt es in der SRK: „Direkte Aussagen zur Hochwasseranhebung von Extremereignissen (z.B. HQ 100 oder größer) aus dem 1D-FTM sind mit Unsicherheiten behaftet, da diese Ereignisse insbesondere für den Abschnitt 1 weit über das Kalibrierspektrum hinausgehen.“ [1/, S. 159].

6.5 Einschätzung der Stromregelungskonzeption (SRK)

Das BAW-Modell 1D-FTM, mit dem die Nachweise der Varianten in der SRK durchgeführt wurden, beruht auf eindimensionalen Sediment-Transportformeln. Es berechnet damit die zeitlich und räumlich gemittelte Sohlenlage und kann keine Dünen oder Dünenhöhen berücksichtigen. Für Eisbrechereinsätze sind jedoch besonders die Dünenhöhen relevant, nicht die mittlere Sohlenlage (vgl. Kapitel 6.1).

Die Dünengeometrie ist nicht statisch, sondern steht mit dem Strömungsangriff in Wechselwirkung. Die SRK führt abschnittsweise zu einer Erhöhung des Strömungsangriffes und durch Erosion zu einer Erhöhung der mittleren Wassertiefe. Dabei kann gleichzeitig die Dünenhöhe zunehmen, was in der SRK jedoch nicht berücksichtigt wird. Im Größenbereich von 0,1 -0,3 m, auf den die SRK mit der Wassertiefenerhöhung abzielt, sind auch Änderungen der Dünenhöhe sehr gut möglich. Damit würde die Wirkung der Maßnahmen der SRK für die Schifffahrt wieder zunichte gemacht.

Die SRK-Maßnahmen führen auch bei Hochwasser noch zu einer Erhöhung des Wasserspiegels. Ob dies im Sinne eines umfassenden Hochwasserschutzkonzeptes für die Oder sein kann, ist fraglich.

Grundsätzlich bestehen bei der Modellierung so viele Unsicherheiten, dass Zweifel daran bestehen, dass das Modellkonzept und die Datengrundlagen der BAW-Untersuchungen für eine belastbare Nachweisführung im Dezimeterbereich und für 40 Jahre Prognosezeitraum ausreichen. Dies betrifft sowohl hydraulische als auch morphologische Parameter. Beispielsweise liegen die lokalen Abweichungen in den modellierten Wasserspiegellagen bereits in der gleichen Größenordnung wie die erhoffte Wirkung der SRK-Maßnahmen auf die Wassertiefe. Auch bei den Eingangsdaten für die Modelle weist die BAW auf die erheblichen Datenlücken hin, insbesondere bei den Sedimenteinträgen der Warthe für die insgesamt nur zwei Stichtagsmessungen vorlagen (vgl. Kapitel 6.1): *„Langzeitprognosen in einem morphologisch aktiven Fluss wie der Grenzoder sind immer mit relativ großen Unsicherheiten verbunden. Weder sind die Daten für den Ist-Zustand im Detail bekannt, noch können die relevanten Parameter für die Zukunft, wie zum Beispiel die Abflüsse an den Einströmrändern und der Feststoffeintrag genau vorhergesagt werden. An der Oder kommt als Unsicherheit hinzu, dass der Feststoffeintrag aus der Warthe weitgehend unbekannt ist. Auch die in nahezu jedem Jahr auftretende geschlossene Eisdecke wird sich auf den Feststofftransport und damit auf die Sohlentwicklung in einer unbekanntem Art und Weise auswirken.“* [1/, S. 174]

Eine Buhneninstandsetzung führt zunächst zu einer Erhöhung der Wasserspiegellage durch Erhöhung der Rauheitswirkung und zu einer Eintiefung der Sohle. Langfristig geht die Rauheitswirkung durch morphologische Prozesse und Buhnenerosion jedoch wieder auf das ursprüngliche Maß zurück. Damit stellen sich dieselben niedrigen Wassertiefen ein wie zuvor – allerdings auf einem niedrigeren Bezugsniveau.

Beim Buhnenausbau durch Verringerung des Streichlinienabstands sind Erosion und Wasserspiegellagenerhöhung noch größer als bei einer Instandsetzung. Die Rauheitswirkung nimmt auch hier mit der Zeit ab und erfordert eine laufende Unterhaltung, um die Wassertiefen zu hal-

ten Durch die ausgeprägte Erosion stellt sich die Wasserspiegellage längerfristig trotzdem auf tendenziell tieferem Niveau ein.

Die Erfahrungen an anderen großen Flüssen wie Elbe, Niederrhein, Weichsel sowie auch am stark regulierten Mittellauf der Oder bestätigen, dass der Wasserspiegel sich nach dem Buhnenausbau längerfristig immer wieder an die erodierte Sohlenlage angepasst hat. Die Folge ist das Absinken des Grundwasserspiegels, was besonders für die Flussauen katastrophal ist.

Für Deutschland ist nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) die gesamte Grenzoder mit Mittlerer Oder (DE_RW_DEBB6_3) sowie Unterer Oder (DE_RW_DEBB6_2) nach dem „aktualisierten Bewirtschaftungsplan nach Artikel 13“ der Richtlinie 2000/60/EG bzw. § 83 WHG für den deutschen Teil der IFGE Oder - „Bewirtschaftungszeitraum 2016 bis 2021“ als **natürlicher Wasserkörper** eingestuft. Damit muss ein mindestens guter ökologischer Zustand erreicht und erhalten werden. „*Eine Verbesserung des ökologischen Potentials der Grenzoder [...]*“ [1/ S. 37], wie es in der SRK heißt, gilt nur für HMWB (heavily modified waterbodies) und entspricht damit nicht den deutlich höheren Anforderungen der WRRL-Bewirtschaftungsziele für die Grenzoder. Grundvoraussetzung ist dabei natürlich eine Harmonisierung der deutschen und polnischen Umsetzungen der WRRL in das jeweilige nationale Recht.

7 Alternative Hochwasserschutz-Ansätze

7.1 Alternativen zum Eisaufbruch mit Eisbrechern

Nach der These des WSA Eberswalde für die Stromregelungskonzeption ist eine Mindestwassertiefe in der Oder notwendig, damit der Einsatz der Eisbrecherflotte gewährleistet werden kann. Die schiffbauliche Konstruktion der Eisbrecher gibt in der Stromregelungskonzeption somit das flussbauliche Ausbauziel der Oder vor. Allerdings ist nicht belegt, dass Eisbrecher überhaupt Schwierigkeiten an Flachstellen haben (siehe Kapitel 6.1).

Ginge man dennoch davon aus, dass die Hypothese des WSA belegt werden könnte und die Eisbrecher Flachstellen unter der Solltiefe von 1,80 m nicht passieren könnten, ließe sich trotzdem der umgekehrte Weg gehen. Dabei würde die schiffbauliche Konstruktion beim Eisaufbruch an die Verhältnisse der Oder angepasst, und nicht umgekehrt.

Ein Beispiel dafür sind die schwimmfähigen Bagger vom Typ „AMPHIBEX“ (Firma Normrock), die in Kanada erfolgreich zum Eisaufbruch auf flachen Flüssen eingesetzt werden. Die Schwimmbagger haben nur etwa 0,6 m Tiefgang, Propellerantrieb und ziehen sich mit ihrer Baggerschaufel eigenständig auf die Eisdecke, so dass etwa die Hälfte des Eigengewichts von 20 Tonnen als Aufbruchkraft zur Verfügung steht. Die Investitionskosten liegen bei ca. 0,8 Mio Euro pro Maschine.

Nachteil der Schwimmbagger gegenüber konventionellen Eisbrechern ist die geringere Schiffsgeschwindigkeit. Hier ist daher ein Mobilitätskonzept in Kombination mit den konventionellen Eisbrechern wichtig, z.B. eine Stationierung der Bagger nahe kritischer Stellen für den Eisversatz oder innerhalb des Schwerpunktbereichs mit flachen Abschnitten. Alternativ ist ein schneller Transport in das Einsatzgebiet per Tieflader möglich. Dabei kann die Auswertung von Satellitenbildern und Vorhersagen zur Eissituation wesentlich zum gezielten und effektiven Einsatz beitragen (Kögel et al., 2017).

Der Aufbruch vom Dammschen See aus nach oberstrom in die Oder kann damit wie bisher weiter erfolgen. An Stellen, an denen die Eisbrecher nicht mehr weiterkommen, z. B. Flachstellen, kommen die Schwimmbagger zum Einsatz und machen den Weg für die Eisbrecher frei.



Abbildung 50: AMPHIBEX AE450E als Eisbrecher (<http://www.normrock.ca/> und <https://i.cbc.ca>)

7.2 Umgang und Probleme mit lokalen Flachstellen

7.2.1 Identifikation von Flachstellen

Wie in Kapitel 6.4.1 dargestellt, ist die Vorgehensweise der Stromregelungskonzeption, die mittlere Sohlenlage durchgängig soweit abzusenken, bis auch an den Flachstellen die Solltiefe von 1,80 m erreicht wird. Die mittlere Sohlenlage wird aus einem Ersatztrapezprofil bestimmt (siehe Kapitel 6.2). Dabei werden Transportkörper in eine gleichmäßige vertikale Sohlenänderung des Querprofils umgerechnet.

Alternierende Sandbänke oder asymmetrische Querschnitte wie in Krümmungen werden bei dieser Methode „ausgemittelt“. Die Definition einer Flachstelle in der SRK bezieht sich daher auch immer auf die mittlere Sohlenlage. Hierzu heißt es weiter: „*Gut zu erkennen ist hier [Anm.: Bezug zu Bild 30 in Abbildung 52 für Oder-km 542 bis 586], dass es sich nicht um einzelne festliegende Stellen handelt. Aufgrund der ausgeprägten morphologischen Dynamik der Odersohle werden immer wieder andere Bereiche zu tiefenbestimmenden Stellen. Trotzdem gibt es einzelne Abschnitte, an denen es entweder immer wieder zu Problemen kommt oder an denen der Zustand der Bauwerke größere Instandhaltungen oder Veränderungen erfordert.*“ [1/, Anhang S. 47]

Zu den Flachstellen heißt es weiter: „*Diese Strecken neigen im Allgemeinen, aufgrund verringerter Fließgeschwindigkeiten gegenüber benachbarten Flussstrecken, eher zu Anlandungen oder infolge zusätzlicher hoher Geschiebemengen zur Dünenbildung.*“ [BAW Zwischenbericht zur SRK, Karlsruhe Juli 2012 in /15/]. In Tabelle 13 sind die Abschnitte mit dauerhaften Flachstellen an der Unteren Oder (ab Warthemündung) und die pauschalen Einschätzungen der Ursachen von deutscher und polnischer Seite zusammengestellt.

Tabelle 13: Flachstellen und Einschätzung seitens der polnischen und deutschen Seite /15/

Oder-km	Abschnitt	Einschätzung deutsche Seite	Einschätzung polnische Seite
645,5 - 654	Gozdowice - Rudnica	<ul style="list-style-type: none"> a) Uneinheitlicher Buhnenzustand b) Buhnenhöhe unter Sollhöhe c) tief liegende Vorländer wegen Aufhöhung des Mittelwasserbettes d) langer gerader Abschnitt ohne Krümmung e) Alternierende Sandbänke infolge unzureichender Regulierung und damit hohen Geschiebetransports f) Sprung im Streichlinienabstand von 188 auf 165 m bei km 639,4 	<ul style="list-style-type: none"> • Buhnenzustand (Zerstörung 70-90%) • umfangreiche Barren (Buhne unter MW) zwischen Oder-km 646,8 und 648,2
654 - 663	Rudnica - Osinów Dolny	<ul style="list-style-type: none"> • gleiche allg. Mängel wie Gozdowice - Rudnica siehe Punkte a) - e) oben • Verlandung der Parallelwerke am rechten Ufer • teilweise Instandsetzung (2005) • Hohenwutzen: abflussabhängiger Rückstau, der sich besonders stark auf den Geschiebetransport und Transportkörperdynamik auswirkt • alternierende Dünen 	<ul style="list-style-type: none"> • Buhnenzustand (Zerstörung 70-90%) • zeitvariabler Strömungsverlauf (durch Barren) • Bauwerke 100% zerstört zwischen Oder-km 656,5 und 658
656 - 659	Hohenwutzen		

Abbildung 52 beinhaltet die Datengrundlage aus der SRK, um Flachstellen genauer zu lokalisieren und lokale Maßnahmen zu planen. Darin sind Längsschnitte der Wassertiefe im Ist-Zustand und die Prognose nach 40 Jahren ohne Maßnahmen dargestellt.

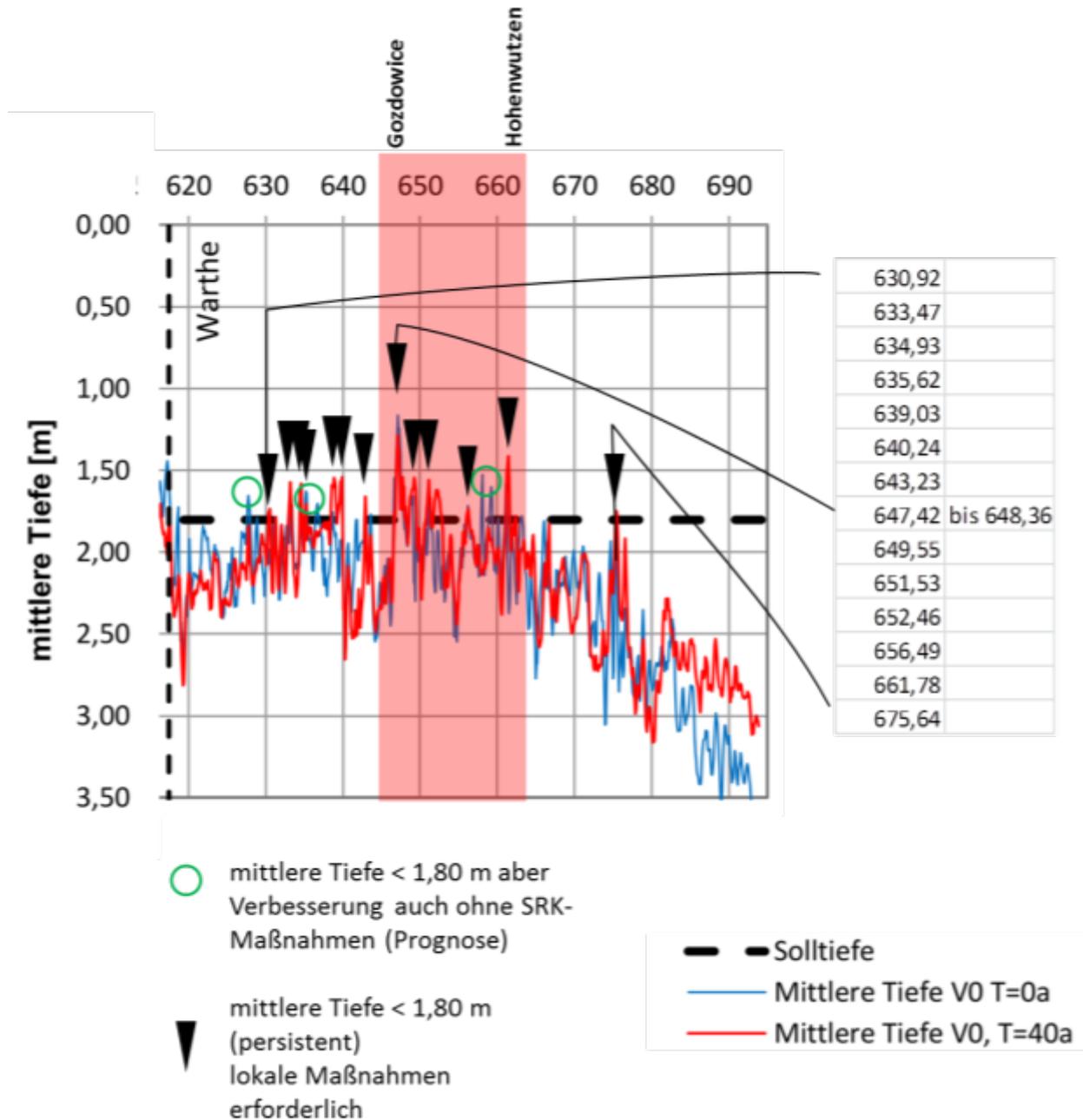


Abbildung 51: Tiefenbestimmende Stellen und Schwachstellen unterhalb der Warthemündung beim Bezugsabfluss $Q_{P\bar{U}80/90}$ (mod. aus /1/, Bild 6-9). Die schwarzen Dreiecke markieren die Flachstellen, für die lokale Maßnahmen erforderlich sind.

In der Abbildung wurden Flachstellen unterhalb der Warthemündung markiert. Die flachsten Stellen treten im Schwerpunktbereich zwischen Gozdowice bis Osinów Dolny / Hohenwutzen auf (647,4 und 661,8 mit jeweils unter 1,5 m Wassertiefe). In Abbildung 53 ist dieser Bereich, wie auch in der SRK; vor einem Kartenhintergrund mit Angabe der lokalen Wassertiefe dargestellt. In Tabelle 14 sind die Flachstellen zur besseren Übersichtlichkeit noch einzeln aufgeführt.

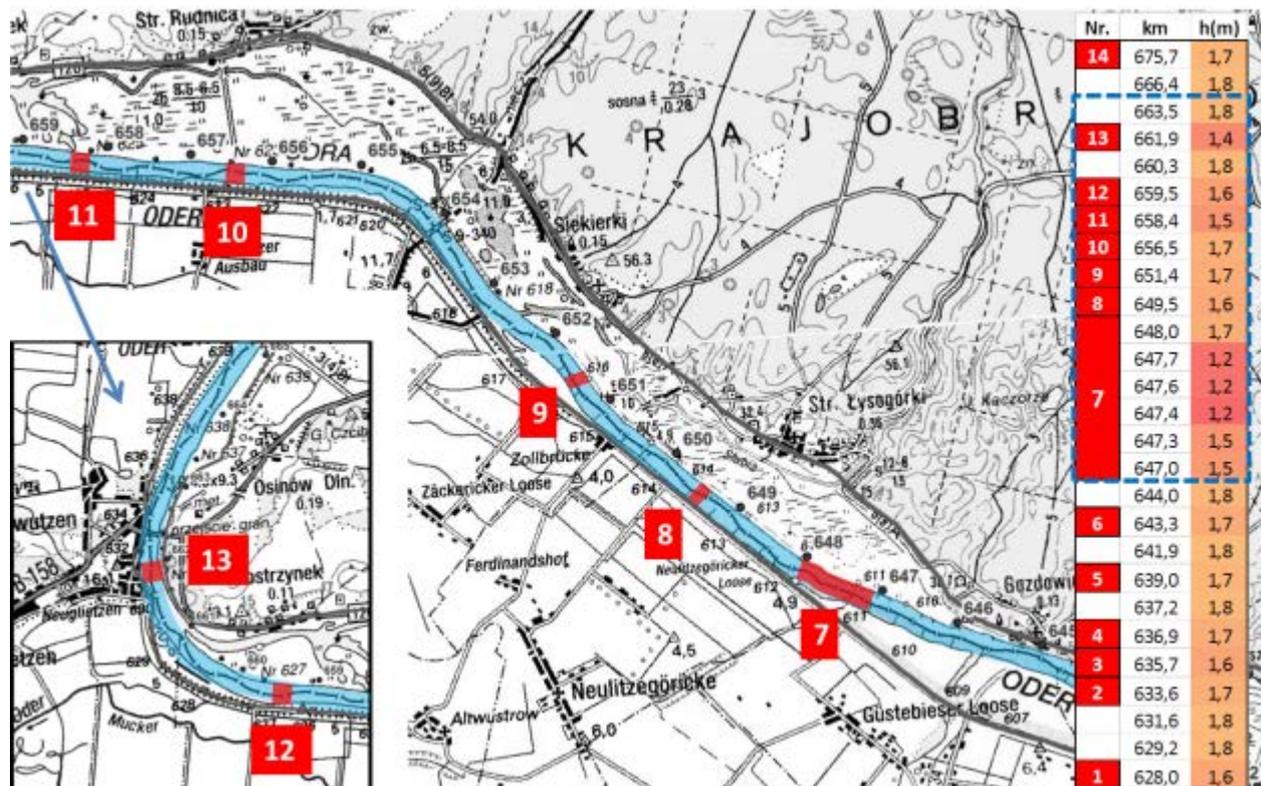


Abbildung 52: Darstellung der lokal persistenten Flachstellen (Wassertiefe $< 1,80$ m bei $Q_{P80/90}$) im Schwerpunktbereich Hohenwutzen mit Tabelle der Flachstellen der Unteren Oder ($\leq 1,80$ m) (mod. aus /1/ Anhang Bild 40, verwendete Daten aus /1/ Bild 6-77)

Tabelle 14: Lokalisierung der persistenten Flachstellen

Oder-km	Nr.	Lage	Hydraulische Bedingungen
675,7	14	unterhalb Bielinek	Aufweitung (parallele Kiesgrube)
661,9	13		
659,5	12		
658,4	11	Schwerpunktbereich	
656,5	10	Gozdowice bis Osinów Dolny	siehe Tabelle 13 und Abbildung 53
651,4	9	und Hohenwutzen	
649,5	8		
647,0 - 648,0	7		
643,3	6	südlich Stary Bleszyn (oberhalb Gozdowice)	Aufweitung mit breiten Vorländern
639,0	5	südlich / oberhalb Czelin	Altarm links
635,7	4	unterhalb Groß-Neuendorf	Aufweitung links
634,9	3	Groß-Neuendorf	Aufweitung links, Krümmungseinfluss
633,6	2	unterhalb Kienitz / Ende Odervorland	am Ende einer Krümmung, nach Zusammenfluss mit linksseitigem Altarm
630,9	1	Sophiental oberhalb Kienitz	gerader Abschnitt, Ende der Aufweitung durch Aue Alte Oder

7.2.2 Schiffspassage an Flachstellen unter eisfreien Bedingungen

Für die Schiffspassage ist die lokale Wassertiefe im Trassenverlauf (Fahrrinne) entscheidend. Eine flächengemittelte Tiefe hat bei morphodynamisch aktiven Flusssohlen wie in der Oder dagegen wenig Aussagekraft für die Schiffbarkeit (siehe Kapitel 6.1). Die BAW hat daher in der SRK /1/ anhand von Auswertungen der physikalischen Modellergebnisse überprüft, ob trotz Dünen und Sandbänke schiffbare Trassenverläufe in der Oder bestehen.

In Abbildung 54 sind die von der BAW optimierten Trassenverläufe für den Schwerpunktbereich um Hohenwutzen dargestellt. Es bestehen klare Trassenverläufe, die um die alternierenden Sandbänke herum verlaufen. Da die Sandbänke langsam, aber stetig in Bewegung sind (vgl. Kapitel 4.2), verlagert sich auch der Trassenverlauf mit der Zeit. Geht man beispielsweise von einer Migrationsgeschwindigkeit der Sandbänke von 1,5 m/Tag /15/ und einem mittleren Abstand der Sandbänke von 600 m aus, dann verläuft die Trasse nach etwa 400 Tagen gespiegelt um die Flussachse (in Abbildung 54 links durch Pfeile dargestellt).

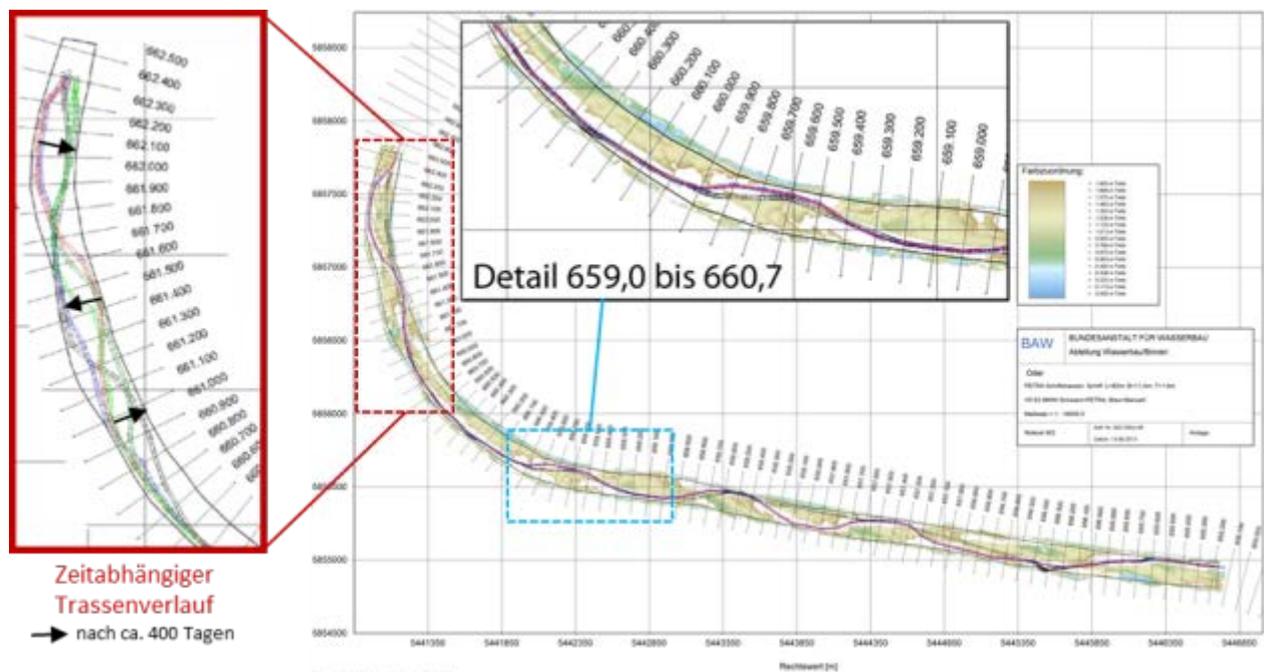


Abbildung 53: Berechnete Schiffstrasse im Ist-Zustand bei Niedrigwasserhältnissen und zeitabhängiger Trassenverlauf aufgrund der Migration der Transportkörper (/1/ Bild 5-35 und 6-19)

Zur Wassertiefe entlang der Trasse heißt es in der SRK: „Im Mittel werden hier zwar durchgehend 1,80 m erreicht [Anm.: die Angabe eines Bezugsabflusses fehlt hierbei]; entlang der Modellstrecke gibt es aber mehrere Bereiche, in denen auch in einer optimierten Trasse mit vielen erforderlichen Schiffsmanövern die mittlere Tiefe in der Fahrspur deutlich geringer als 1,80 m ist.“ [/1/, S. 104]

In Abbildung 55 ist der Vergleich aus Punktmessungen der Wassertiefe in der Fahrrinne mit einer Mittelung für den Ist-Zustand (V0) dargestellt. Zumindest für diesen Versuch lässt sich die obige Aussage, dass die mittlere Tiefe der Fahrspur deutlich geringer als 1,80 m ist, nicht bele-

gen. Im Gegenteil werden die 1,80 m hier im Mittel sogar durchgängig eingehalten, obwohl lokal Wassertiefen bis minimal 1,05 m (hier bei km 656,8) eintreten.

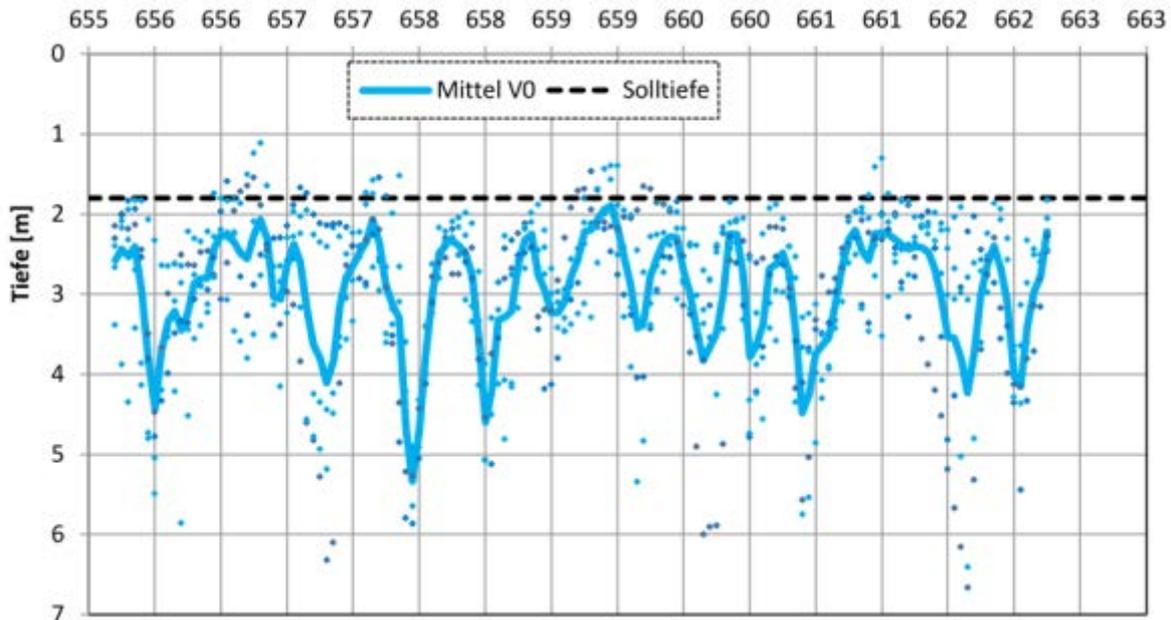


Abbildung 54: Mittlere und lokale Tiefen an der Schiffposition entlang der Schiffstrasse (/1/ Bild 6-20)

Ergänzend dazu enthält Abbildung 56 die minimalen Tiefen einer Versuchsreihe beim Bezugsabfluss $Q_{P\ddot{U}80}$ an der Schiffposition. Lokale Minima treten etwa alle 600 m auf und entsprechen damit der Länge der Sandbänke bzw. den Wendepunkten, an denen die Trasse in der Strommitte über die Verbindung zwischen alternierenden Sandbänken hinweg verläuft.

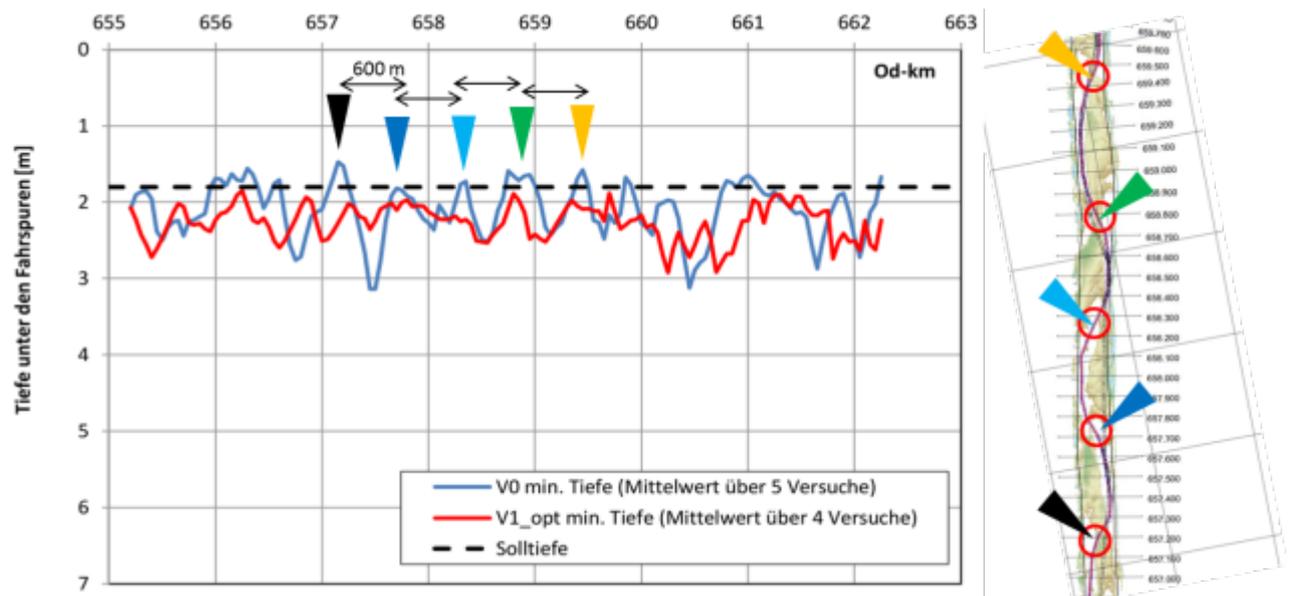


Abbildung 55: Minimale Tiefen bei $Q_{P\ddot{U}80}$ an der Schiffposition (mod. aus /1/ Bild 6-50) und Markierung der Minima bzw. Wendepunkte im Trassenverlauf (mod. aus /1/Bild 5-35)

Zusammenfassend sind also schiffbare Trassen vorhanden, auch wenn lokal einmal Wassertiefen unter 1,80 m beim Bemessungsabfluss ($Q_{P\ddot{U}80}$) unterschritten werden.

Dass solche punktuellen Flachstellen an Dünenkämmen für Bootsrümpfe grundsätzlich kaum ein Hindernis darstellen, konnten Versuche an der TU Delft nachweisen. Robijns (2014) konnte in physikalischen Modellversuchen zeigen, dass die lokale Geschwindigkeitserhöhung in Sohlennähe bei der Bootspassage flussaufwärts zur Erosion der Dünenkämme führt (Abbildung 57). Damit erzeugten die Bootsrümpfe gewissermaßen einen eigenen Freispülstrahl unter dem Kiel und setzten nicht auf. Die Erosion der Dünenkämme verstärkte sich weiterhin bei mehrmaligem Überfahren.



Abbildung 56: Geschwindigkeitsverteilung unter dem Bootsrumpf und resultierende Erosion bei Passage eines Dünenkamms und Bergfahrt (aus Robijns, 2014)

7.2.3 Zusammenfassung zu Flachstellen und Schiffbarkeit

Die bisherigen Ausführungen legen nahe, dass derzeit keine Notwendigkeit von flussbaulichen Maßnahmen aufgrund von Flachstellen in der Unteren Oder besteht:

- Es ist nicht belegt, dass der Einsatz von Eisbrechern überhaupt durch Flachstellen eingeschränkt wird (Kapitel 6.1). Falls dies doch der Fall sein sollte, bieten alternative Eisaufruchmethoden einen Weg, ohne flussbaulich in die Oder eingreifen zu müssen (Kapitel 7.1).
- Trotz abschnittsweiser Unterschreitungen einer mittleren Wassertiefe von 1,80 m lassen sich Trassen finden, die eine Schiffspassage bei eisfreien Verhältnissen ermöglichen (Kapitel 7.2.2). Lokale Minima entlang der Trasse aufgrund von Dünenkämmen sind für die Passage von Bootsrümpfen ebenfalls kein größeres Problem (Kapitel 7.2.3).
- Selbst wenn die identifizierten Flachstellen ein Problem darstellen würden, belaufen sie sich insgesamt auf nur wenige Kilometer Fließstrecke (Kapitel 7.2.1). Eine durchgängige Bühneninstandsetzung entlang der Grenzoder mit zusätzlichem abschnittweisem Ausbau, wie in der Stromregelungskonzeption vorgesehen, ist damit keinesfalls gerechtfertigt (vgl. Kapitel 6.4.1).

Demgegenüber erscheint es sinnvoll, in ein besseres Monitoring der Sandbänke und eine verbesserte Umsetzung in aktualisierte Trassenverläufe zu investieren, die der Schifffahrt schnell zur Verfügung gestellt werden.

Autonome unbemannte Messboote, die mit Echolot und GPS ausgestattet permanent die Flusssohle im Bereich von Flachstellen aufzeichnen, sind mittlerweile Stand der Technik für kleinere Gewässer (Abbildung 58).



Abbildung 57: Beispiel eines autonomen GPS-Echolot-Messboots („Sonobot“ <http://www.geo-dv.de>)

Eine Hochskalierung dieser Messtechnik auf die Oder ist grundsätzlich möglich. Dadurch wären Datenanalysen und Neuberechnungen von Trassenverläufen praktisch in Echtzeit möglich.

Außerdem ließe sich durch ein systematisches Monitoring die Dynamik der Transportkörper besser vorhersagen. Für die Verhältnisse bei Eisbedeckung könnte ebenfalls auf die letzten noch erhobenen Daten vor dem Zufrieren zurückgegriffen werden.

Auch Baggerungen bzw. Spülungen können durch Nutzung aktueller Sohlendaten besser geplant und effizienter umgesetzt werden. Baggerungen sind als flankierende Maßnahmen auch in der SRK aufgeführt und können genutzt werden, um Sedimentablagerungen weiter unterhalb dauerhaft entgegenzuwirken. (/1/, S. 88).

7.3 Deichrückverlegung bei Święta

Die Hochwassergefahr in Szczecin geht vor allem von erhöhten Wasserständen in der Ostsee und damit im Stettiner Haff und Dammschen See aus (siehe Kapitel 3.3 bis 3.5). Maßnahmen oberhalb von Szczecin, wie z.B. Flutpolder in der Unteren Oder, wirken sich daher kaum noch auf die Wasserstände in Szczecin aus.

Der Wasserstand in Szczecin (Westoder) liegt im Mittel ca. 17 cm über dem im Stettiner Haff (Ueckermünde), maximal können aber bis 39 cm eintreten, wie beim Hochwasser im Juni 2010 (Abbildung 59).

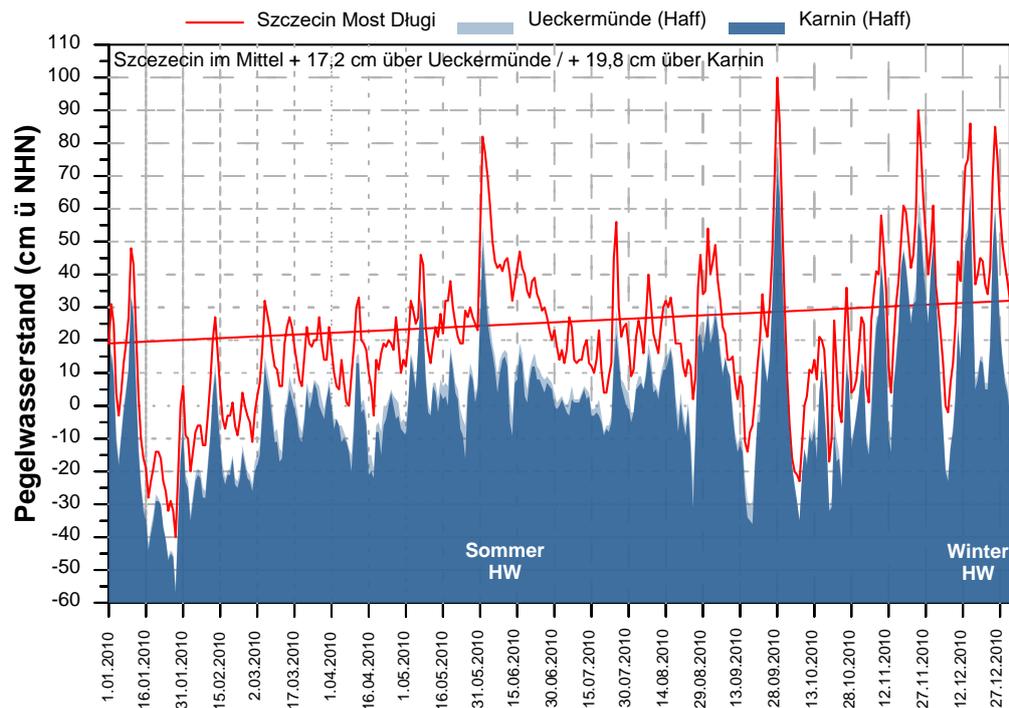


Abbildung 58: Wasserstände im Jahr 2010 im Stettiner Haff und der Westoder in Szczecin

Der Wasserspiegellagenverlauf zwischen den dargestellten Pegeln lässt sich ohne hydraulische Modellierung nicht angeben. Es lässt sich jedoch die Aussage treffen, dass der Großteil der vorhandenen Wasserspiegeldifferenz zwischen Szczecin und dem Stettiner Haff entlang der Fließstrecke bei Świąta abgebaut wird.

Durch eine Aufweitung des Fließquerschnitts bei Świąta ist es prinzipiell möglich, den Wasserstand für Szczecin etwas abzusenken und damit zum Hochwasserschutz beizutragen. Möglich wäre dies z.B. durch eine Deichrückverlegung mit Ringdeichen um einzelne Schutzgüter (Abbildung 60).



Abbildung 59: Mögliche Deichrückverlegung bei Świąta

Wie sich solche Maßnahmen auf die Hydraulik bei Hochwasser auswirken, kann jedoch nur auf Basis einer 2D-hydrnumerischen Modellierung genauer untersucht werden.

8 Zusammenfassung

Die Oder ist einer der letzten großen Flüsse in Mitteleuropa, der im Unterlauf noch freifließend und nicht staugeregelt ist. Damit weist die Oder noch eine weitgehend intakte Durchgängigkeit für den Abfluss, mitgeführte Sedimente und auch Organismen (ökologische Durchgängigkeit) auf.

Verglichen mit staugeregelten Flüssen konnte damit bisher eine Vielzahl von wasserwirtschaftlichen und ökologischen Problemen weitgehend vermieden werden, z. B. ein aufwendiges Sedimentmanagement mit andauernder Geschiebeabgabe wie am Rhein oder der Elbe oder die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit für Fische wie den Ostseeschnäpel oder den Stör. Damit bietet die Oder permanent oder vorübergehend Lebensräume für Arten, die sonst wahrscheinlich bereits verloren gegangen wären.

Der Mensch hat seit Jahrhunderten in das Stromsystem der Oder eingegriffen und tut dies noch immer. Im Gegensatz zu einem Staustufenausbau blieb durch Laufkorrekturen und Bühnenausbau der Charakter der Oder als Fließgewässer und großer Strom jedoch erhalten.

Auf der anderen Seite haben die Ereignisse im Sommer 1997 und 2010 ins Bewusstsein zurückgebracht, dass auch eine Verbesserung der Hochwassersituation für die Oder notwendig ist. Dazu wurden von polnischer und deutscher Seite Konzepte vorgelegt, die im Rahmen des vorliegenden Berichtes dargestellt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit analysiert wurden.

Im polnischen Konzept wurde der Ausbau von Międzyodrze (Zwischenoderland) zum gesteuerten Flutpolder untersucht. Die Überprüfung ergab dabei, dass die nutzbare Polderfläche und das Poldervolumen wesentlich kleiner sind als von polnischer Seite im Weltbank-Antrag (PAD) angegeben. Das Volumen beträgt 54,27 Mio m³ bei 1,0 m Einstautiefe und damit nur 5,4% des im PAD angegebenen Wertes.

Unter Berücksichtigung der komplexen hydraulischen Randbedingungen im Bereich der Unteren Oder ist dieses Konzept jedoch keine Verbesserung gegenüber der bereits bestehenden Wirkung des Polders als Hochwasserschutz. Hierfür sind zwei Argumente ausschlaggebend. Zum einen würde die derzeitige Funktion als natürlicher Fließpolder aufgegeben, der zu einer Vergrößerung des Fließquerschnitts bei Hochwasser beiträgt und damit zu einer Stabilisierung der Wasserstände und Retention von Eisschollen führt. Zum anderen ist durch die Lage von Międzyodrze und die dort bereits stark abgeflachten Hochwasserwellen ohne ausgeprägte Hochwasserscheitel die Wirksamkeit eines gesteuerten Flutpolders äußerst gering. Beispielrechnungen für die Hochwasser 1997 und 2010 ergeben unter idealen Bedingungen eine Verringerung des Wasserspiegels von nur wenigen Zentimetern. Außerdem steigt der Wasserspiegel bei der gesteuerten Flutpoldernutzung schneller an und erhöht das Hochwasserrisiko durch verkürzte Vorlaufzeiten und größeren Rückstau für die Oberlieger.

Die deutsche Stromregelungskonzeption (SRK) des WSA Eberswalde, die von der BAW erarbeitet wurde, sieht eine durchgängige Instandsetzung und den abschnittswisen Ausbau der Bühnen entlang der gesamten Grenzoder vor. Dem Konzept liegt die Hypothese zugrunde, dass eine minimale mittlere Wassertiefe vorhanden sein muss, um Eisbrechern eine freie Fahrt und damit den Eisauflauf zu ermöglichen. Die SRK zielt damit ausschließlich auf die Situation

bei Eishochwasser im Winter / Frühjahr, bei denen nur kleinere bis mittlere Hochwasserabflüsse eintreten. Durch Modifikation der Buhnen soll mit der SRK die mittlere Sohlenlage der Oder eingetieft aber gleichzeitig die Wasserstände möglichst unverändert gehalten werden, um mehr Fahrwassertiefe zu schaffen. Die Untersuchungen der BAW waren äußerst aufwendig, fachlich herausfordernd und gingen bis in Bereiche, die wissenschaftlich noch nicht erschlossen sind. Hierzu gehört die Transportdynamik einer dreidimensional strukturierten Flusssohle – insbesondere unter einer Eisdecke. Letztendlich wurde in der SRK daher ausschließlich die mittlere Sohlenlage betrachtet. Zur Struktur und besonders zur Höhe der Dünen und Transportkörper an der Odersohle, insbesondere bei Eisbildung, gibt es in der SRK keine Aussagen. Die Dünenhöhe an den Dünenkämmen ist jedoch für den Einsatz der Eisbrecher das entscheidende Kriterium und nicht die mittlere Wassertiefe.

Die Unsicherheiten in der Berechnung der Sohlenentwicklung der Oder bei einem Prognosezeitraum von 40 Jahren sind damit naturgemäß groß. Darauf weist die BAW auch gleich zu Beginn der SRK hin. Der durch den Buhneausbau prognostizierte Wassertiefengewinn ist demgegenüber relativ klein und liegt in der Größenordnung der Modellunsicherheiten. Die Wirksamkeit der geplanten Maßnahmen in der SRK lässt sich damit nicht zweifelsfrei und damit auch nicht belastbar nachweisen. Negative hydraulisch-morphologische Auswirkungen sind dagegen ebenfalls nicht auszuschließen, z.B. eine Dynamisierung der Transportkörper oder eine Aufstufung und damit Vergrößerung der Dünen.

Zusammenfassend ist bei den beiden untersuchten Konzepten eine positive Wirkung im Sinne des Hochwasserschutzes zweifelhaft. Außerdem fehlen ganzheitliche Ansätze, wie sie bei großen Flusssystemen zwingend erforderlich sind. Dazu gehört eine ganze Palette von Maßnahmen, beginnend mit der Verbesserung des Rückhalts im Einzugsgebiet über den Einsatz alternativer Eisbrecher und Eisaufbruchmethoden (konventionelle Boote mit weniger Tiefgang oder Amphibex-Bagger) bis hin zu nachhaltigem Sedimentmanagement und Küstenentwicklung der Ostsee.

Angesichts der Herausforderungen, die der Klimawandel und ein ansteigender Ostseewasserstand mit sich bringt, ist ein umfassendes multinationales Hochwasserrisikomanagement für die Oder erforderlich. Die Probleme, die von der Stromregelungskonzeption und dem Ausbau von Międzyodrze zum gesteuerten Polder taxiert werden, machen dabei nur einen kleinen Teil aus.

Literaturverzeichnis

- 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)
- 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.

Errata S.25 ff.

In der Druckversion der Tabelle 3 und dem dazugehörigen Text sind Bezugsabflüsse und Werte zu den Schubspannungen falsch zusammengestellt worden. Die Tabelle und der beschreibende Text müssen daher wie folgt abgeändert werden:

In Tabelle 3 sind die sedimentologischen und hydraulischen Daten für den Ist-Zustand und die Anwendung des Diagramms zusammengestellt. Es zeigt sich, dass beim Bemessungsabfluss für 80% bzw. 90% Überschreitungswahrscheinlichkeit ($Q_{P\ddot{U}80/90}$) der Schubspannungsüberschuss τ_0/τ_{krit} in der gesamten Grenzoder noch unter dem Wert von 10 liegt. Das bedeutet, dass Erhöhungen des Strömungsangriffes in diesem Abflussbereich mit einer Erhöhung der Dünensteilheit verbunden sind. Etwa bei Mittelwasserabflüssen im Bereich des Einheitsmittelswassers (EMW) wird der Wert von 10 erreicht und die Dünen erreichen ihre maximale Steilheit. Wird der Abfluss weiter über das EMW hinaus erhöht, kommt es zu verstärktem Suspensions-transport und die Dünen ebnen sich ein und werden flacher.

Tabelle 3: Berechnung des Schubspannungsüberschusses an wichtigen Punkten der Oder

Oder-km	Korngröße d_{50} (mm) SRK (Bild 3-4)	Bewegungs- beginn nach Shields τ_{krit} (N/m ²)	Wassertiefe h (m) bei $Q_{P\ddot{U}80/90}$ (SRK Bild 6-9)	Gefälle I_0 (-) (SRK Bild 3-5)	Berechneter Strömungs- angriff τ_0 (N/m ²)	Schub- spannungs- überschuss τ_0 / τ_{krit} (-)
542	1,0	1,0	1,9	2,8E-04	5,2	5,4
617	0,7	0,7	1,7	2,4E-04	3,9	5,8
618	0,8	0,8	2,5	2,4E-04	5,8	7,4
700	0,5	0,5	3,3	4,2E-05	1,3	2,8

Durch den Ausbau der Bühnen gemäß SRK steigen Strömungsangriff und Sohlenschubspannung im Flussbett. Zweidimensionale Dünen in der Grenzoder würden dadurch im Bereich des Bemessungsabflusses ($Q_{P\ddot{U}80/90}$) steiler und höher werden. Diese Entwicklung der Dünen würde einer durch den Bühnenausbau erwünschten Sohleneintiefung entgegenwirken.