

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Masterplan Ems 2050

**Hier: Ergänzende Untersuchungen zum
Ergebnisbericht der BAW vom April 2016**

Auftragsnummer B3955.03.12.10234

Einleitung

Die BAW hat im Rahmen der Untersuchungen zum Masterplan Ems 2050 ausgehend von einer dauerhaften Sohlschwelle am Emssperrwerk (siehe auch BAW (2010) und BAW (2015)) verschiedene Varianten einer flexiblen Sohlschwelle und eine zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser zur Minderung des residuellen Schwebstoffeintrags in die Ems numerisch untersucht und die Wirkung auf Hydrodynamik, Salzintrusion und den Schwebstoff-Haushalt analysiert. Diese Ergebnisse sind im Ergebnisbericht über die Wirkung einer dauerhaften und flexiblen Sohlschwelle und eines um Tideniedrigwasser geschlossenen Emssperrwerks (BAW 2016) zusammengestellt.

Die dauerhafte Sohlschwelle zeigt Potential den residuellen Schwebstofftransport in der Unterems vorteilhaft zu beeinflussen. Nachteilig ist, dass sie zu einer eingeschränkten ökologischen Durchgängigkeit führt und den Bau einer Schleuse am Emssperrwerk zwingend erforderlich macht.

Aus diesem Grund kam die Idee einer flexiblen Sohlschwelle auf, welche nur zu bestimmten Tidephasen aktiv ist. Im aktiven Zustand der flexiblen Sohlschwelle sind die Nebenöffnungen NÖ1 bis NÖ5 und die Binnenschifffahrtsöffnung (BSÖ) geschlossen. Der Drehsegmentverschluss der HSÖ wird so gedreht, dass die Oberkante des Verschlusses bei NHN-4m liegt. Zunächst stellte sich die grundsätzliche Frage, ob eine Einengung des Querschnitts während des Ebbe- oder des Flutstroms sinnvoller ist. Ein Vergleich dieser beiden Varianten einer flexiblen Sohlschwelle zeigt, dass nur die Einengung des Querschnitts im Flutstrom zu einer Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports im Vergleich zum Ist-Zustand und zur dauerhaften Sohlschwelle führt. Um die Einschränkungen für die Schifffahrt weiter zu verringern, wurde die Dauer, die die flexible Sohlschwelle aktiv ist, variiert und der Querschnitt so nicht während des gesamten Flutstroms sondern nur während eines Teils des Flutstroms eingeengt. Hierbei zeigt sich, dass die flexible Sohlschwelle einerseits nicht während des gesamten Flutstroms aktiv sein sollte, da sonst das Tidevolumen zu stark reduziert wird. Andererseits sollte die flexible Sohlschwelle aber lange genug aktiv sein, um eine ausreichende Verlängerung der Flutstromdauer zu erzielen. Optimal bezüglich des residuellen Schwebstofftransports ist eine Dauer von 4 Stunden plus Öffnungs- und Schließzeiten. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass sich während des aktiven Betriebs der flexiblen Sohlschwelle aufgrund der Querschnittseinengung hohe Strömungsgeschwindigkeiten am Sperrwerk und stromauf davon ausbilden, welche eine Belastung für die Standsicherheit des Sperrwerks und die Gewässersohle darstellen.

Um die Ausbildung dieser Fahne hoher Strömungsgeschwindigkeiten zu vermeiden und die auftretenden maximalen Geschwindigkeiten am Sperrwerk zu reduzieren, wurde eine Variante untersucht, welche den Querschnitt am Emssperrwerk nicht einengt, sondern den Durchfluss zeitweise komplett unterbindet. Bei der zeitweisen kompletten Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser wird das Emssperrwerk ab einem Wasserstand von -1m

NHN bei ablaufendem Wasser komplett geschlossen und bei Wasserstandsgleichheit zwischen Ober- und Unterwasser im Flutstrom wieder geöffnet. Hierdurch wird in der Unterems und im Emdrer Fahrwasser ein ebbestrom-dominanten Schwebstofftransport erzielt, was eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand bedeutet. Die Transportbilanz der 4h-Sohlschwelle wird jedoch nicht erreicht. Neben der Vermeidung der Ausbildung einer Strömungsfahne bietet diese Variante zudem noch den Vorteil einer geringeren Sperrzeit und somit eine geringere Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs.

Die beschriebenen Ergebnisse empfehlen die weitere Verfolgung der 4h-Sohlschwelle und der zeitweisen kompletten Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser ab einem Wasserstand von -1m NHN (im folgenden -1m-Schließung). Mit Blick auf den Ziel- und Bewertungskatalog wird die Wirksamkeit dieser beiden Varianten im Folgenden bei verschiedenen Abflüssen und in Kombination mit einem Polder überprüft. Ein Überblick über die in diesem Bericht dargestellten Parameter des Ziel- und Bewertungskatalogs und ein Verweis auf die entsprechenden Abbildungen bzw. Kapitel ist in Tabelle 2 zu finden. Des Weiteren wird bei beiden Varianten auf das Vorkommen von Sunk- und Schwallwellen eingegangen.

In der gutachterlichen Stellungnahme von ZANKE (2016) wird die Möglichkeit der Reduzierung der sich bei der Querschnittseinengung ausbildenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten stromauf des Sperrwerks durch eine Verteilung des Durchflusses über die gesamte Breite des Sperrwerks aufgezeigt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden außerdem noch zwei alternative Varianten der 4h-Sohlschwelle untersucht: Die Teilöffnung und die Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle. Bei der Variante der Teilöffnung wird die HSÖ komplett geschlossen, die anderen sechs Tore werden unterströmt. Bei der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle ist während der Querschnittseinengung ein Durchfluss durch alle sieben Tore möglich. In der HSÖ entsteht mithilfe des Drehsegmentverschlusses eine Sohlschwelle bei -1m NHN. Die anderen sechs Tore sind teilgeschlossen und werden unterströmt.

HN-Modell

Die Wirksamkeit der Varianten wird mittels des hydrodynamisch-numerischen Modells UNTRIM (CASULLI & WALTERS 2000; CASULLI & ZANOLLI 2002) in Kopplung mit dem morphodynamisch-numerischen Modell SediMorph (BAW 2005a) untersucht.

Im Vergleich zu dem für den Ergebnisbericht verwendeten HN-Modell der Ems wurde in dem hier verwendeten Modell die Berechnung des Durchflusses bei Steuerung der Emssperrwerkstore verbessert.

Eine detaillierte Beschreibung des HN-Modell ist im BAW-Gutachten zur Außenemsvertiefung (BAW, 2012) zu finden. Für die hier durchgeführten Untersuchungen sind neben der bereits genannten Verbesserung folgende Änderungen gegenüber dem Gutachten zur Außenemsvertiefung vorgenommen worden:

- Der Zeitschritt des HN-Modells beträgt 5 Sekunden anstatt eine halbe Minute und
- die Berücksichtigung der Temperatur und des Temperaturgradienten für die Dichteberechnung findet nicht statt.

Für die Realisierung der für die Untersuchungen zur Verteilung des Durchflusses über die gesamte Breite des Sperrwerks nötigen unterströmten Toresteuerung muss eine neue Modellversion verwendet und das Modellsetup angepasst werden (siehe Kapitel Teilöffnung).

Das Modellgebiet muss ausreichend groß gewählt werden, damit die Änderungen durch die geplanten Varianten nicht bis zum Seerand des Modells reichen. Das Modellgebiet reicht deshalb vom Wehr und der Schleuse bei Herbrum bis in die Nordsee seewärts der ostfriesischen Inseln Borkum, Juist und Norderney (Bild 1). Die Nebenflüsse Leda und Jümme, sowie die Ersatzsysteme der an die Nebenflüsse angeschlossenen Tiefs (z.B. Sagter Ems und Elisabethfehnkanal) sind im Modellgebiet enthalten, um eine möglichst naturgetreue Simulation der Wasserstände auch in Leda und Jümme und Aufteilung der Volumenströme an der Ledamündung zu erhalten.

Das Modellgebiet ist mit einem unregelmäßigen Gitternetz aus Drei- und Viereckselementen überzogen. Dieses unregelmäßige Netz erlaubt eine an die Topographiegradienten angepasste Auflösung und ermöglicht so einen wirtschaftlichen Umgang mit Speicherplatz und Rechenzeit. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt in der horizontalen etwas mehr als $221 \cdot 10^3$, was bei der vertikalen Auflösung von 1 m zu über 1,6 Million Elementen führt. Die Kantenlängen des Netzes variieren von ca. 10 m im Bereich der Fahrrinne des Dortmund-Ems-Kanals bis zu 1 km am seeseitigen Modellrand.

Die Bathymetrie des Gitternetzes basiert auf dem digitalen Geländemodell 2010 der Ems und wurde in der Fahrrinne von der Nordsee bis Papenburg auf die Bedarfstiefen vertieft, wenn es im digitalen Geländemodell 2010 flacher war.

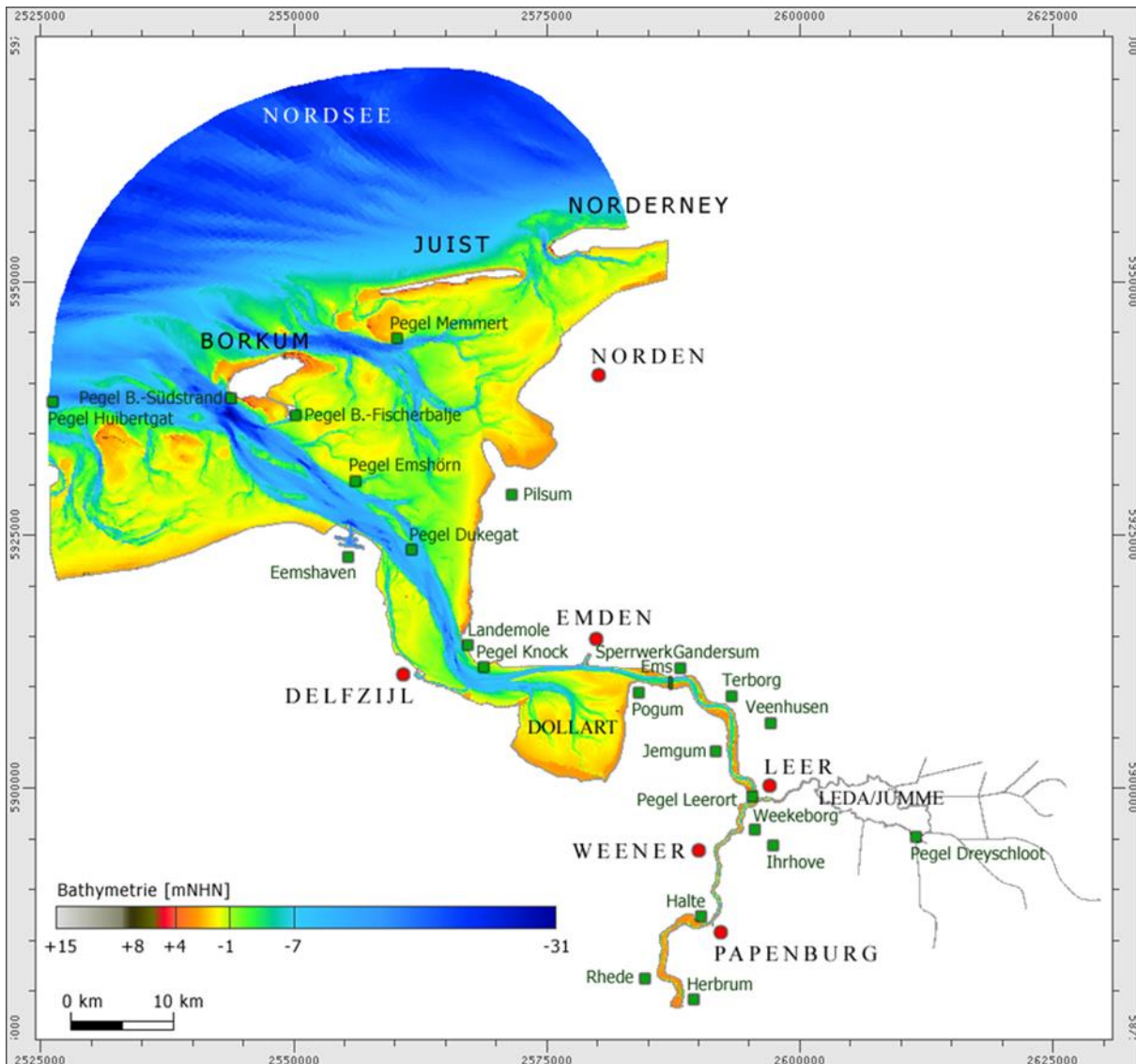


Bild 1: Das Modellgebiet des Ems-Modells von seewärts der ostfriesischen Inseln Borkum, Juist und Norderney bis zum Wehr Herbrum.

Wichtig ist, dass der Zeitraum der Simulation ausreichend lang gewählt wird, damit im Anschluss an einen Modelllauf eine Analyse der Tidekennwerte erfolgen kann. Deshalb beträgt der Simulationszeitraum für alle Modellläufe 4 Wochen: 2 Wochen für das Einschwingen des Modells, um insbesondere bezüglich des Salzgehalts zu naturähnlichen Ergebnissen zu gelangen und im unmittelbaren Anschluss daran ein zweiwöchiger Zeitraum, der für die spätere Analyse der Tidekennwerte verwendet wird. Damit ist gewährleistet, dass für einen vollständigen Spring-Nipp-Zyklus (28 Tiden) die erforderlichen Tidekennwerte bestimmt werden können. Dieser Zeitraum ist ausreichend lang genug, um die hydrodynamischen Änderungen durch eine geplante Untersuchungsvariante belastbar ableiten. Die Bestimmung der Tidekennwerte ist notwendig, um die Wirkzusammenhänge aufzeigen zu können. Die Tidekennwerte der Strömung, des Schwebstoffes und des Salzgehalts werden querschnittsgemittelt oder für Transport-Größen querschnittsintegriert im Längsschnitt dargestellt, sind

also repräsentativ als Mittelwert, bzw. als Integralwert für den gesamten Querschnitt. Die Tidekennwerte des Wasserstandes werden in Fahrrinnenmitte angegeben. Eine Erläuterung der Tidekennwerte ist im Anhang zu finden.

Der Simulationszeitraum ist so gewählt, dass der mittlere Tidehub der 28 Tiden des Analysezeitraums am Pegel Hubertgat mit dem mittleren Tidehub für 2010 übereinstimmt. Für die 28 Tiden des Analysezeitraums vom 6. bis 21. Mai 2010 beträgt der mittlere Tidehub 2,16 m. Das WSA Emden nennt den gleichen Wert als Mittelwert für 2010. In Bild 2 ist der Wasserstand während des Analysezeitraums am Pegel Hubertgat, welcher auf dem Seerand liegt, dargestellt.

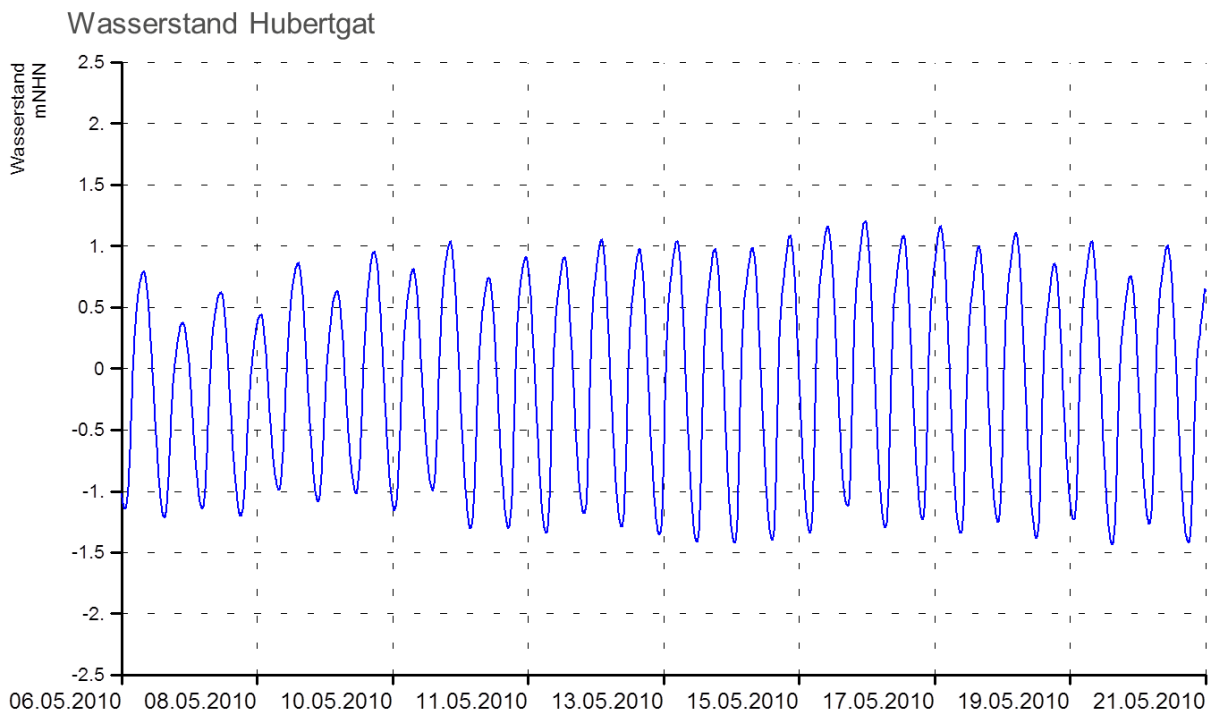


Bild 2: Wasserstand am Pegel Hubertgat im Analysezeitraum

Die Salzanfangsverteilung basiert auf vorhandene Messungen und nimmt abschnittsweise linear von 32 ppt am Seerand bis auf 0,32 ppt in Herbrum ab. Am seeseitigen Rand wird ein konstanter Salzgehalt von 32 PSU eingesteuert, der Salzgehalt des Oberwasserzuflusses beträgt konstant 0,32 ppt.

Bei Sedimenttransportuntersuchungen wird das modellierte Sedimentverhalten entscheidend durch die Anfangsverteilung des Sedimentinventars am Boden bestimmt. Das Sedimentinventar der Außenems und des Dollart wird auf der Grundlage von 1816 Sedimentproben beschrieben, die vom RIKZ für dieses Gebiet analysiert wurden. Das Sedimentinventar der Unterems wird auf der Grundlage von Bodenproben des WSA Emden entlang der Fahrrinne

der Unter- und Außenems von Herbrum bis Ems-Kilometer 55 beschrieben. Aus diesen Daten wurde für die Modellrechnungen dieser Untersuchung ein Datensatz konstruiert, der das Sedimentinventar flächenhaft mittels 2 Fraktionen für die Geschiebefracht (Grobsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 500 µm und Feinsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 125 µm) und einer Fraktion für den Transport in Suspension (schluffiges Material mit einem mittleren Korndurchmesser von 20 µm, Sinkgeschwindigkeit nach Stokes) beschreibt (s.a. Tabelle 1). Das Emders Fahrwasser bildet den Übergangsbereich zwischen diesen beiden Sedimentverteilungen.

Tabelle 1: Anteil der verwendeten Sedimentfraktionen am Bodenvorrat zu Beginn des Simulationszeitraums

	Außenems und Dollart	Unterems
Grobsand	6 %	0 %
Feinsand	73,9 %	21 %
Schluff	20,1 %	79 %

Bis auf die Abflussanalyse wird der Oberwasserzufluss der Ems für alle anderen Untersuchungen auf den zeitlich konstanten Wert 44 m³/s festgelegt. Dieser Wert entspricht dem häufigsten Abfluss der Ems bei Versen für die gewässerkundlichen Jahre 2002 bis 2011, multipliziert mit 1,1, um die Zuflüsse zwischen Versen und dem Modellrand bei Herbrum zu berücksichtigen (siehe Bild 3).

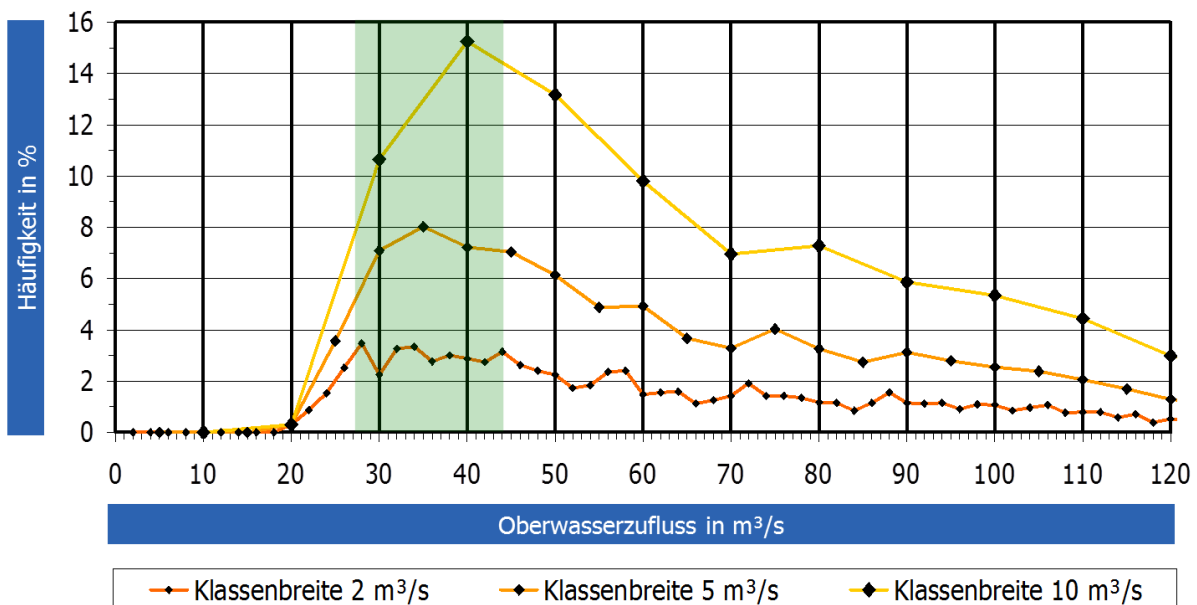
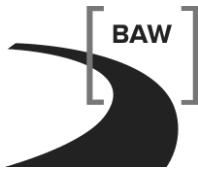


Bild 3: Häufigkeitsverteilung für 3652 Tagesmittelwerte des Abflusses Versen (Gesamt) für den Zeitraum 1 November 2001 bis 31. Oktober 2011 und für drei verschiedene Klassenbreiten. Grün hinterlegt der Wertebereich des Oberwasserzuflusses mit den höchsten Häufigkeiten



Die im Kapitel 6 des Ergebnisberichts der BAW (2016) genannten Annahmen und Einschränkungen sind auch für die in diesem Bericht dargestellten ergänzenden Untersuchungen gültig. Besonders sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die quantitativen Ergebnisse und räumlichen Variationen streng genommen jedoch nur für die gewählten Anfangs- und Randbedingungen gültig sind und nur mit Berücksichtigung der genannten Annahmen und Einschränkungen betrachtet werden sollten. Des Weiteren sei hier erwähnt, dass die Änderungen des Schwebstoffgehalts nur eine Momentaufnahme darstellen. Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Varianten ist der residuelle Schwebstofftransport entscheidend. Durch den durch die Varianten geänderten Schwebstofftransport ist langfristig mit abnehmenden Schwebstoffgehalten im Dortmund-Ems-Kanal, in der Unterems und im Emsder Fahrwasser und somit auch wiederum mit geringen Transportmengen zu rechnen.

Variation des Oberwassers

Im folgendem wird die Wirksamkeit der 4h-Sohlschwelle und der -1m-Schließung bei verschiedenen Abflussszenarien überprüft. Wie im Ergebnisbericht der BAW (2016) auch bleibt der Abfluss bei allen Szenarien während des gesamten Simulationszeitraums konstant. Die im Modell verwendeten Abflusswerte basieren auf einer Analyse von Abflussmessungen zwischen 1990 und 2014 und werden so gewählt, dass sie die saisonale Variation des Oberwassers berücksichtigen.

Dem Simulationszeitraum entsprechend wird zum einen das minimale gleitende Mittel über 29 Tage verwendet, welches in Versen 17,07 m³/s beträgt (Bild 4). Multipliziert mit 1,1 ergibt sich so in Herbrum ein Abfluss von 18,78 m³/s. Der Abfluss von Leda und Jümme wird um den gleichen Faktor wie der Abfluss in Herbrum (im Vergleich zu den ursprünglichen Werten von 44 m³/s Herbrum und 5,7 m³/s Leda und Jümme) verändert. Hieraus ergibt sich in diesem Szenario für Leda und Jümme ein Abfluss von jeweils 2,45 m³/s.

Der mittlere Abfluss zwischen 1990 und 2014 beträgt 80,66 m³/s in Versen, woraus sich für dieses Szenario ein Abfluss von 88,73 m³/s in Herbrum und von 11,46 m³/s für Leda und Jümme ergibt.

Bild 5 zeigt, dass sich im hier verwendeten Ist-Zustand bei einem Abfluss von 150 m³/s in Herbrum in der Unterems durchgängig ein ebbestrom-dominanter Schwebstofftransport einstellt, weshalb dieser Abfluss bei der folgenden Analyse verwendet wird. Für Leda und Jümme beträgt der Abfluss bei diesem Szenario jeweils 19,44 m³/s.

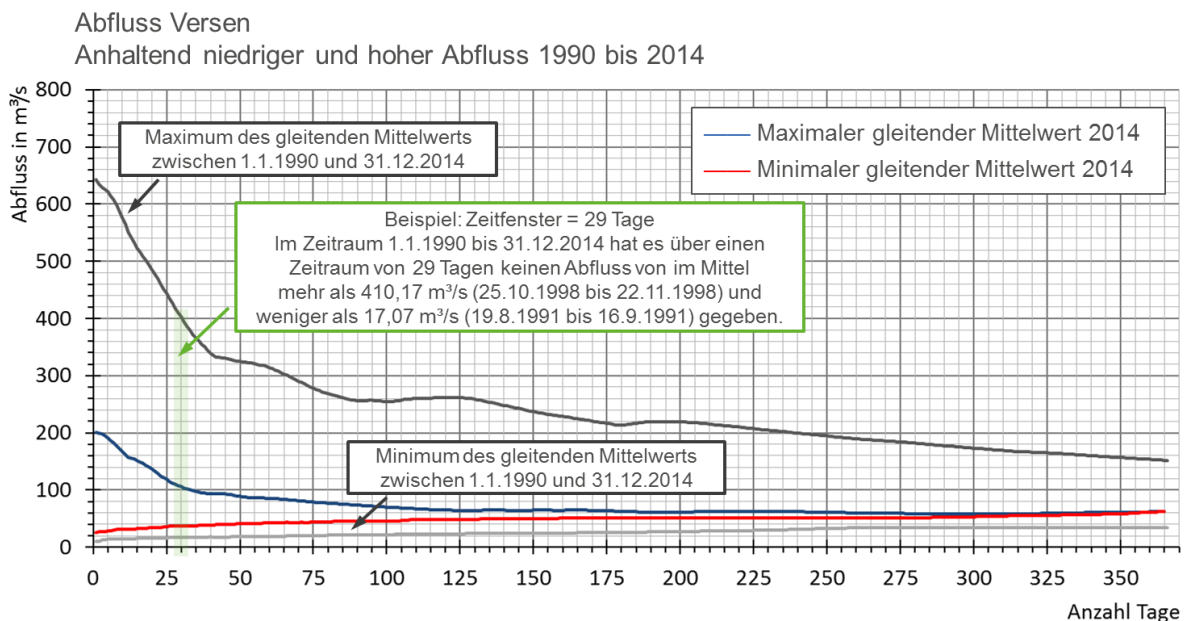


Bild 4: Abflussanalyse Versen 1990 – 2014. Maximale und minimale gleitende Mittel für verschiedene Zeitfenster

Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport

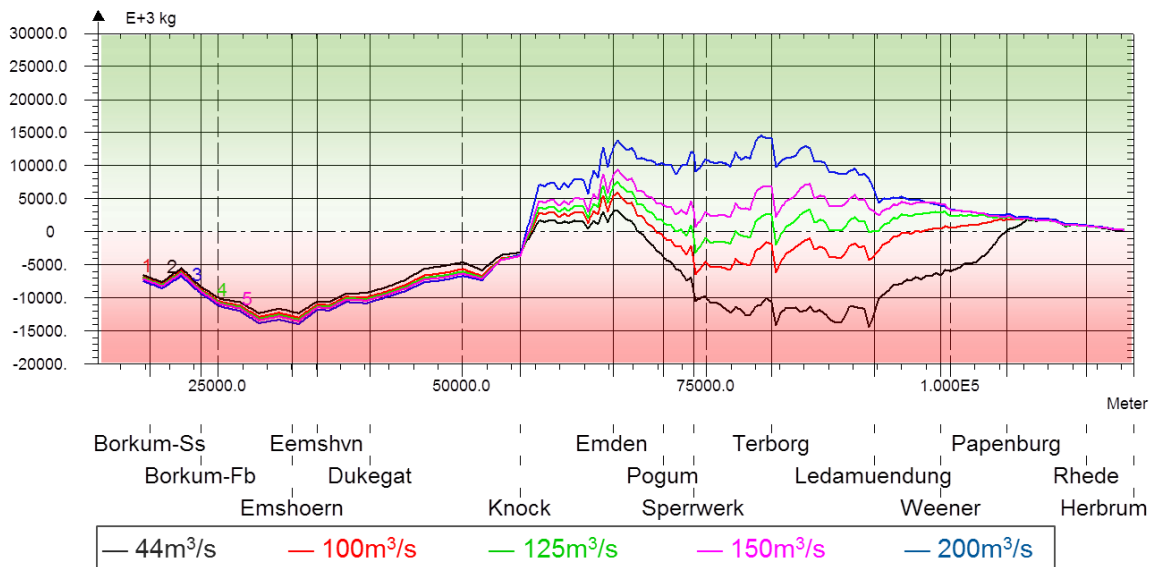


Bild 5: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand verschiedener Abflusszenarien (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Bei den folgenden Abbildungen ist zu beachten, dass der Ist-Zustand für jedes Abflusszenario variiert und somit die jeweilige Variante immer im Vergleich zum passenden Ist-Zustand zu sehen ist.

Sowohl die 4h-Sohlschwelle als auch die -1m-Schließung führen bei allen drei untersuchten Abflüssen zu einer Verbesserung des Schwebstofftransports in der Unterems im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand (Bild 6 und Bild 8). Bei höheren Abflüssen stellt sich sowohl im Ist-Zustand als auch durch die 4h-Sohlschwelle und die -1m-Komplettschließung ein besserer Netto-Schwebstoff-Transport ein. Die Differenz des residuellen Schwebstofftransports zwischen Variante und Ist-Zustand ist stromauf von Terborg bei niedrigen Abflüssen größer als bei hohen Abflüssen. Im Emdener Fahrwasser ist die Differenz und somit die absolute Änderung bei hohen Abflüssen größer (Bild 7 und Bild 9).

In der Außenems ändert sich der residuelle Schwebstofftransport bei allen Abflusszenarien nur wenig. Es bleibt beim flutstrom-dominanten Schwebstofftransport, der tendenziell verstärkt wird.

Auch im Dortmund-Ems-Kanal (DEK) treten nur geringe Änderungen des residuellen Schwebstofftransport auf. Der Ist-Zustand des 18,78 m³/s Szenarios weist im DEK einen

flutstrom-dominanten Transport auf, welcher durch die 4h-Sohlschwelle in einen ebbestrom-dominanten Transport umgekehrt wird. Die -1m-Schließung bewirkt im DEK bei einem Abfluss von $18,78 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports und kehrt diesen im nördlichen Teil des DEK in einen ebbestrom-dominanten Transport um. Bei den anderen beiden Abflussszenarien ist im DEK ein ebbestrom-dominanter Transport auch im Ist-Zustand vorhanden, welcher durch die beiden Varianten erhalten bleibt.

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

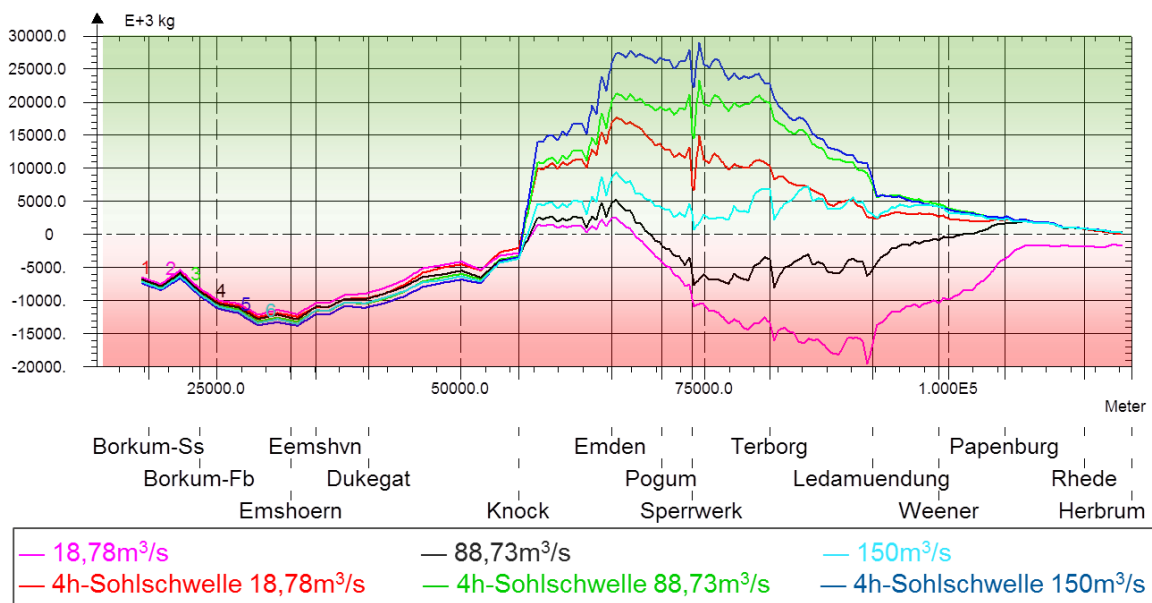


Bild 6: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige 4h-Sohlschwelle (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Differenz des mittleren residuellen Schwebstoff-Transports
 der 4h-Sohlschwelle zum jeweiligen Ist-Zustand

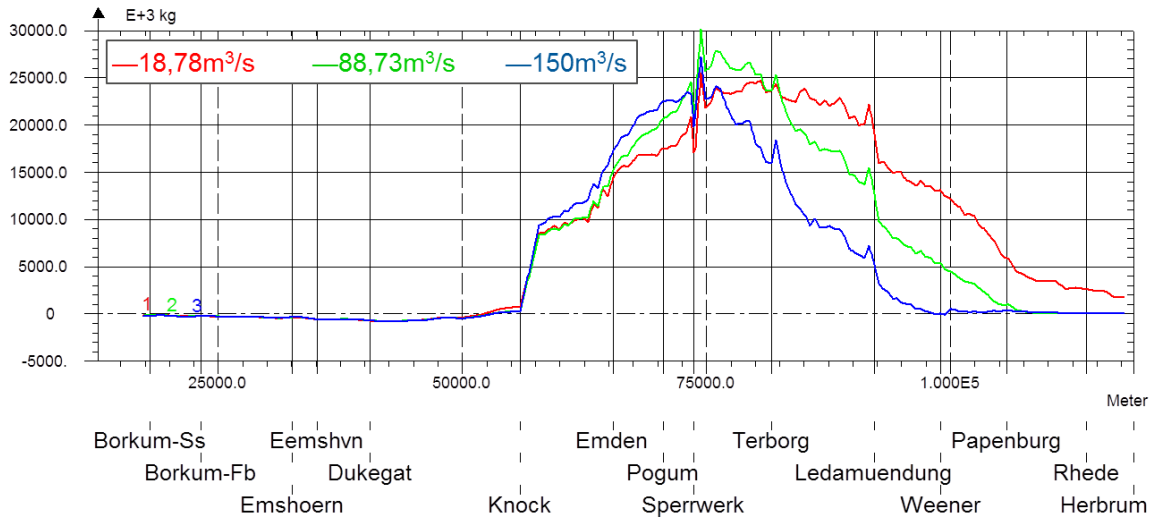


Bild 7: Differenz des mittleren residuellen Schwebstoff-Transports der 4h-Sohlschwelle zum jeweiligen Ist-Zustand für die drei Abflussszenarien 18,78 m³/s (rot), 88,73 m³/s (grün) und 150 m³/s (blau).

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

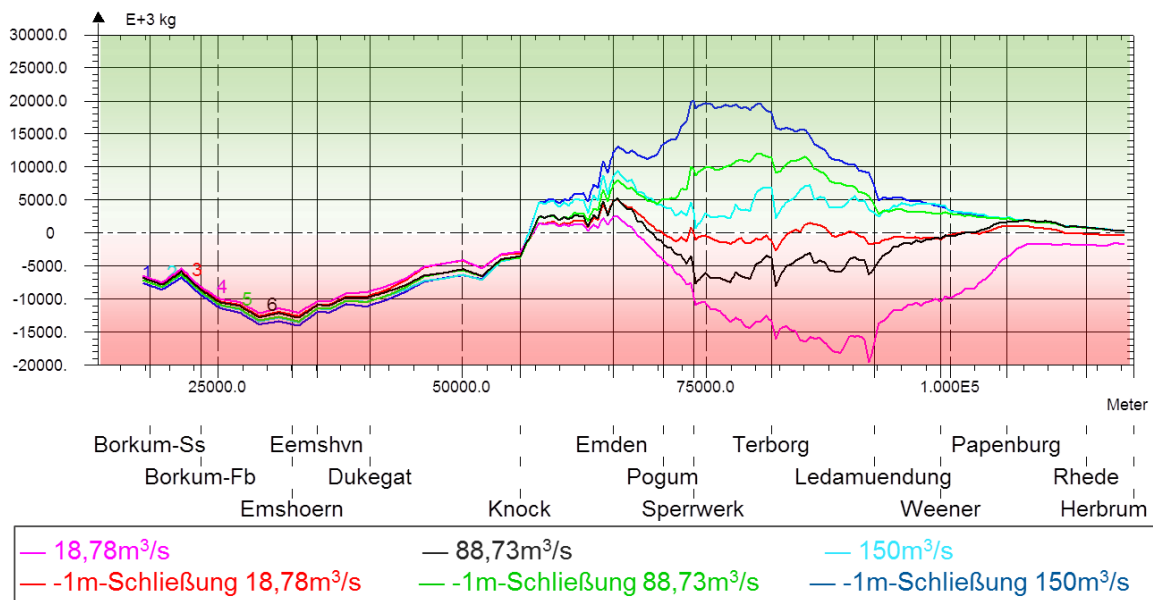


Bild 8: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige -1m-Schließung (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Differenz des mittleren residuellen Schwebstoff-Transports
 der -1m-Schließung zum jeweiligen Ist-Zustand

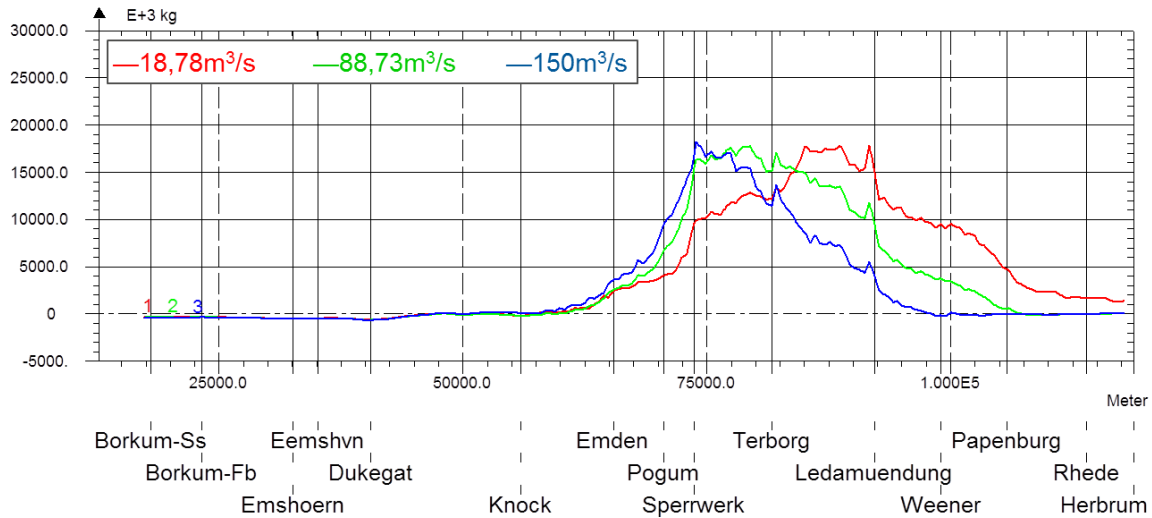


Bild 9: Differenz des mittleren residuellen Schwebstoff-Transports der -1m-Schließung zum jeweiligen Ist-Zustand für die drei Abflussszenarien 18,78 m³/s (rot), 88,73 m³/s (grün) und 150 m³/s (blau).

Der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt wird bei allen Abflüssen in der Unterems durch die 4h-Sohlschwelle und die -1m-Schließung reduziert. Je höher der Abfluss ist, desto weiter stromab beginnt der Bereich, wo der Schwebstoffgehalt reduziert wird. Bei einem Abfluss von 18,78m³/s beginnt die Reduzierung erst etwas stromauf des Sperrwerks.

Die Lage der Trübungszone ist abhängig vom Abfluss. Bei hohen Abflüssen beginnt sie weiter seewärts als bei niedrigen Abflüssen. Bei allen Abflussszenarien führt die 4h-Sohlschwelle und die -1m-Schließung zu einer Verschiebung des seewärtigen Beginns der Trübungszone im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand. Diese Verschiebung fällt bei hohen Abflüssen kleiner aus als bei niedrigen, weshalb die Zunahme des Schwebstoffgehalts im Emders Fahrwasser im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand bei niedrigen Abflüssen größer ist als bei hohen Abflüssen. Da die -1m-Schließung die Lage der Trübungszone weniger beeinflusst als die 4h-Sohlschwelle ist die Zunahme des Schwebstoffgehalts im Emders Fahrwasser geringer.

In der Außenems sind die Veränderungen des Schwebstoffgehalts sehr gering. Sowohl die 4h-Sohlschwelle als auch die -1m-Schließung bewirken bei allen drei Abflussszenarien eine Reduzierung des mittleren und maximalen Schwebstoffgehalts im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand. Diese Reduzierung ist bei der 4h-Sohlschwelle deutlicher zu erkennen als bei der -1m-Schließung.

Im Dortmund-Ems-Kanal wird der Schwebstoffgehalt sowohl durch 4h-Sohlschwelle als auch durch die -1m-Schließung reduziert. Diese Reduzierung fällt bei niedrigen Abflüssen größer aus als bei hohen und ist bei dem Abflussszenario von 150 m³/s kaum mehr erkennbar (Bild 10, Bild 11, Bild 12 und Bild 13).

Mittlerer Schwebstoffgehalt (Schluff)

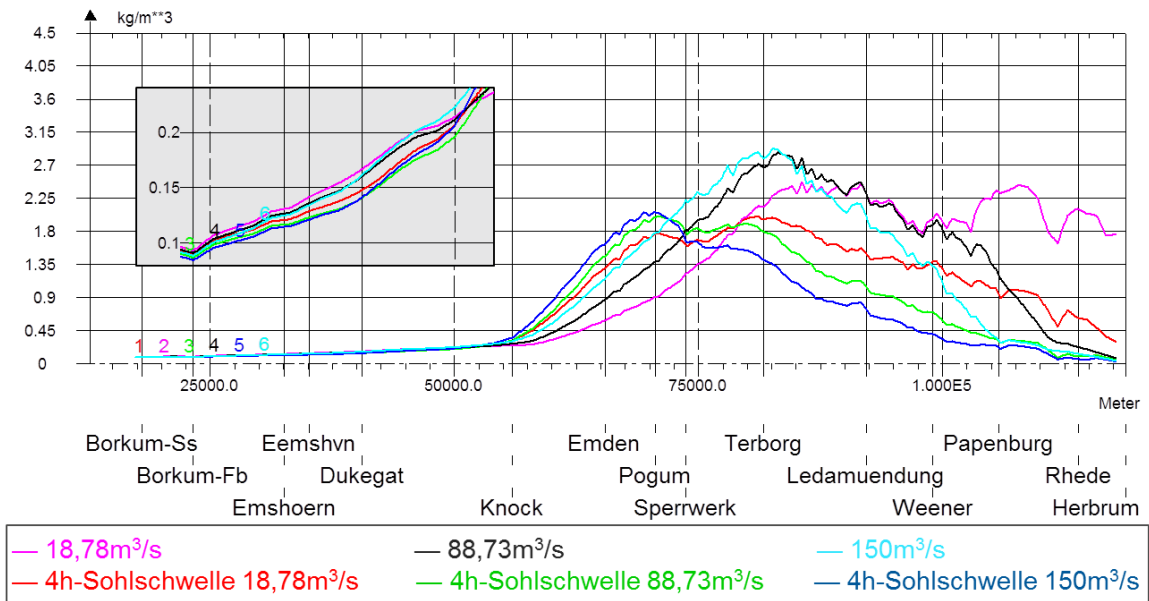


Bild 10: Mittlerer Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abfluss-szenarien und die jeweilige 4h-Sohlschwelle (Querprofil-Mittelung).

Maximaler Schwebstoffgehalt (Schluff)

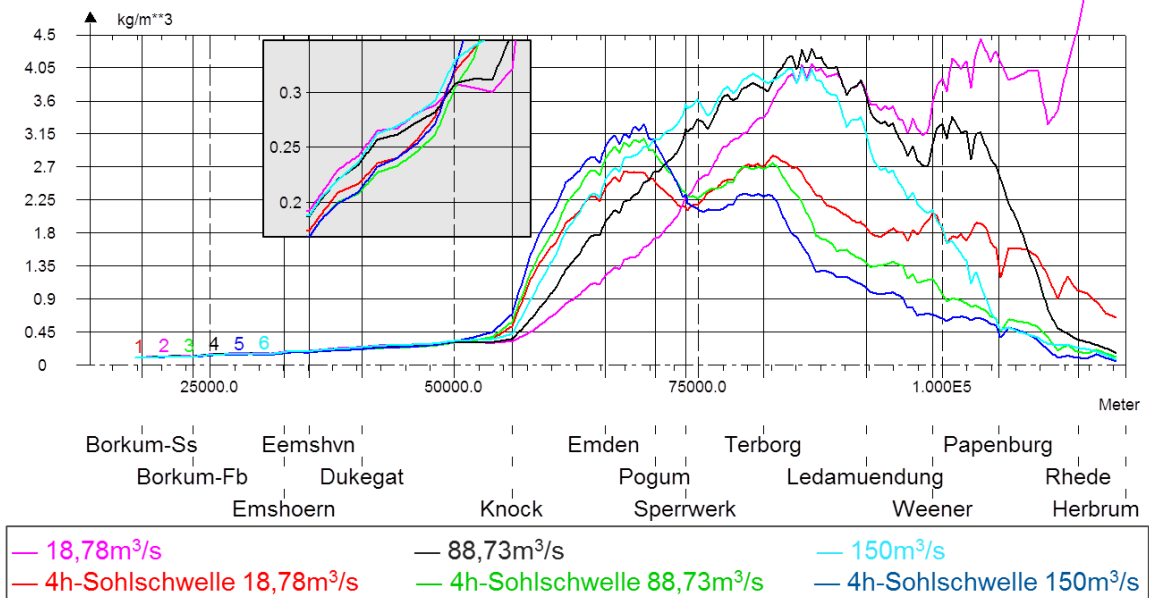


Bild 11: Maximaler Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abfluss-szenarien und die jeweilige 4h-Sohlschwelle (Querprofil-Mittelung).

Mittlerer Schwebstoffgehalt (Schluff)

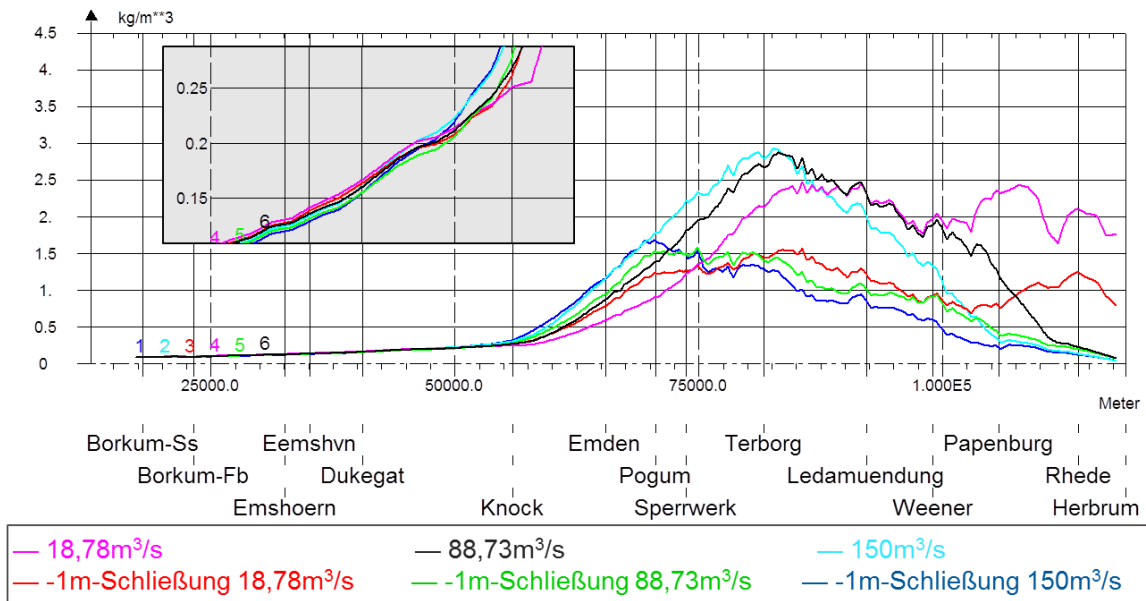


Bild 12: Mittlerer Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige -1m-Schließung (Querprofil-Mittelung).

Maximaler Schwebstoffgehalt (Schluff)

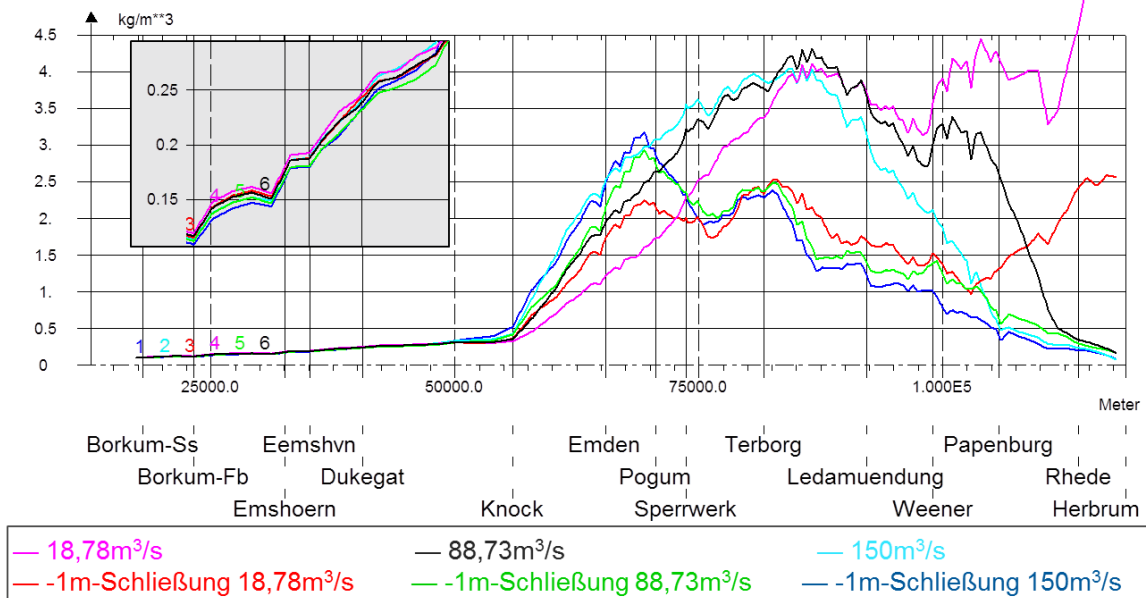


Bild 13: Maximaler Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige -1m-Schließung (Querprofil-Mittelung).

Die Veränderung des maximalen Salzgehaltes mit dem Abfluss ist größer als die Veränderung durch die beiden Varianten. Je kleiner der Abfluss ist, desto weiter kann das salzhaltige Wasser in die Unterems vordringen.

Durch die 4h-Sohlschwelle wird der maximale Salzgehalt im Emdener Fahrwasser bei allen untersuchten Abflüssen verringert. In der Unterems findet keine durchgängige Verringerung statt. Zwischen Terborg und Ledamündung wird der Salzgehalt im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand erhöht, was in Bild 14 vor allem bei einem Abfluss von 18,78 m³/s deutlich wird.

In der Unterems und im Emdener Fahrwasser wird der maximale Salzgehalt durch die -1m-Schließung bei allen drei Abflussszenarien im Vergleich zum jeweiligen Ist-Zustand verringert. Die Verringerung ist bei niedrigen Abflüssen größer als bei hohen (Bild 15).

Maximaler Salzgehalt

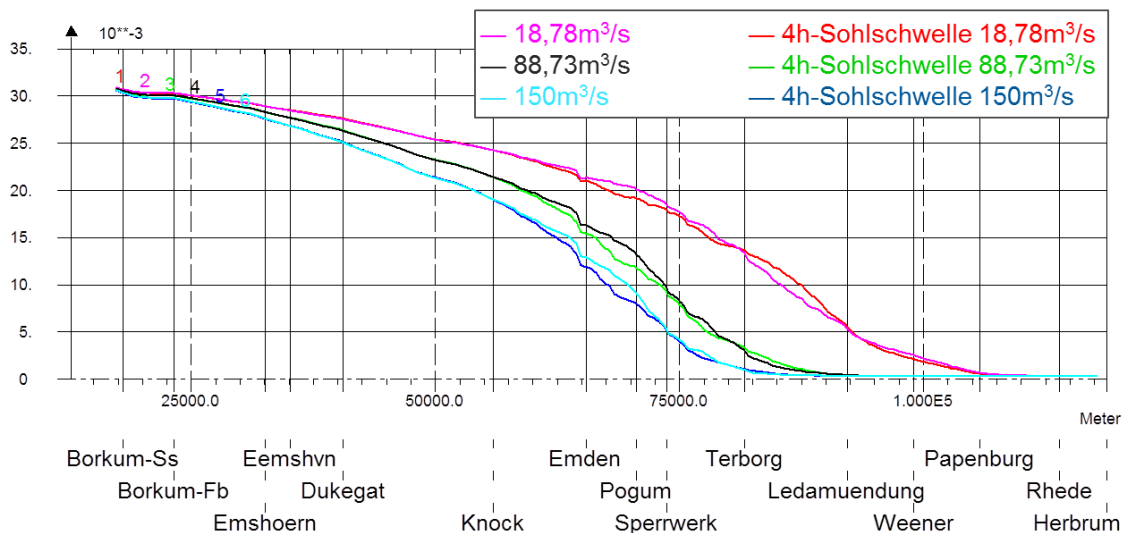


Bild 14: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige 4h-Sohlschwelle (Querprofil-Mittelung).

Maximaler Salzgehalt

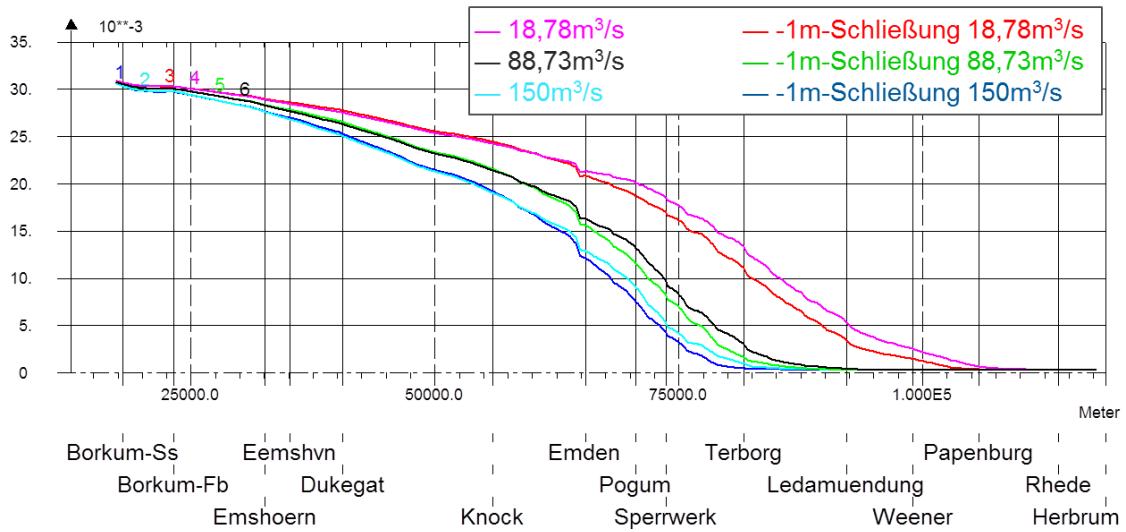


Bild 15: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die Ist-Zustände der drei Abflussszenarien und die jeweilige -1m-Schließung (Querprofil-Mittelung).

Sunk- und Schwallwellen

Durch Durchflussänderungen hervorgerufene Wasserspiegelanhebungen werden als Schwall bezeichnet, Wasserspiegelabsenkungen als Sunk (BOLLRICH & AIGNER 2015). In Bild 16 sind schematisch die vier Grundformen von Schwall und Sunk dargestellt. Beim Schließen der Sperrwerkstore im Flutstrom kann es zu einem Absperrersunk stromauf und ein Stauschwall stromab des Sperrwerks kommen. Beim Schließen der Tore im Ebbestrom tritt der Absperrersunk stromab und der Stauschwall stromauf des Sperrwerks auf. Das Öffnen der Sperrwerkstore im Flutstrom kann einen Füllschwall stromauf und einen Entnahmesunk stromab des Sperrwerks auslösen. Im Ebbestrom kann das Öffnen der Tore zu einem Füllschwall stromab und zu einem Entnahmesunk stromauf des Sperrwerks führen.

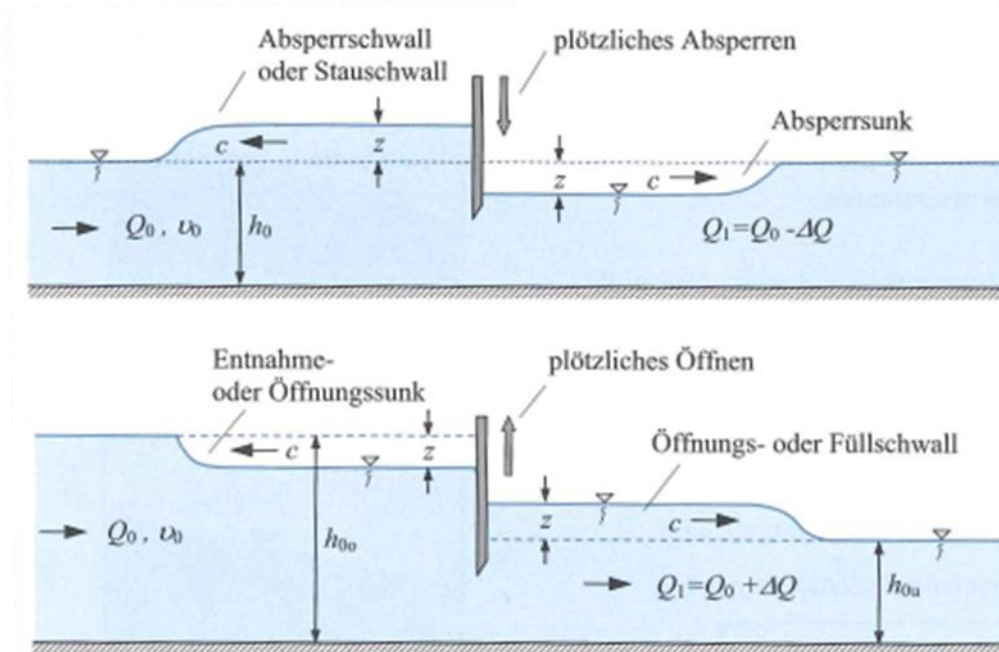


Bild 16: Grundformen des Schwalls und des Sunks aus BOLLRICH & AIGNER (2015)

Wie im Ergebnisbericht der BAW (2016) dargestellt, werden bei der 4h-Sohlschwelle durch das Öffnen der Sperrwerkstore deutlich in den Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten sichtbare Sunk- und Schwallwellen ausgelöst. Der Vergleich von Wasserständen im Längsprofil zu verschiedenen Zeitpunkten während des Öffnens zeigt auf, dass der Füllschwall ausgeprägter vorhanden ist als der Entnahmesunk (Bild 17). Der Füllschwall wird am Wehr in Herbrum reflektiert und führt so zu einer Anhebung des Tidehochwassers stromauf von Papenburg (siehe BAW 2016). Die Reflektion des Füllschwalls am Wehr in Herbrum ist in Bild 18 dargestellt. Um die entstehenden Sunk- und Schwallwellen zu reduzieren, können Steuerungen mit einer langsameren Öffnungsdauer untersucht werden. Damit die Sperrzeit hierdurch nicht verlängert wird, sollte hierbei nicht das Ende des Öffnens nach hinten verschoben werden, sondern das Öffnen der Tore früher beginnen.

Da zum Zeitpunkt des Schließens bei der 4h-Sohlschwelle sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen, sind die durch das Schließen ausgelöste Sunk- und Schwallwellen minimal.

Füllschwall und Entnahmesunk bei der 4h-Sohlschwelle

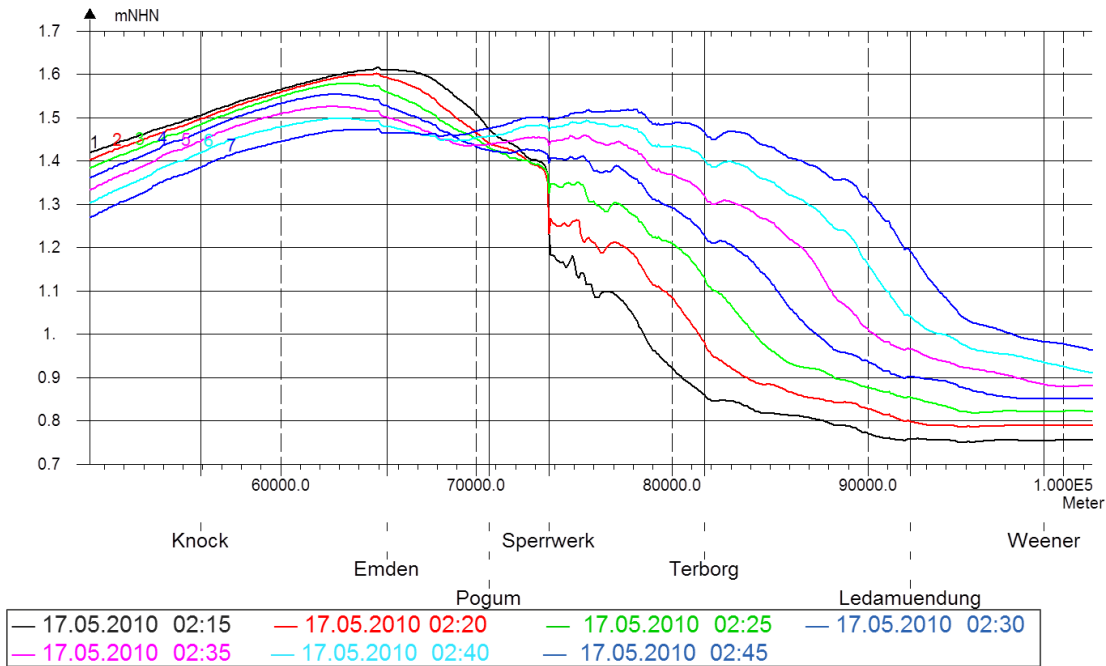


Bild 17: Wasserstände der 4h-Sohlschwelle zu verschiedenen Zeitpunkten im Längsprofil beim Sperrwerk während des Öffnens der Sperrwerkstore.

Reflektion des Füllschwalls am Wehr Herbrum bei der 4h-Sohlschwelle

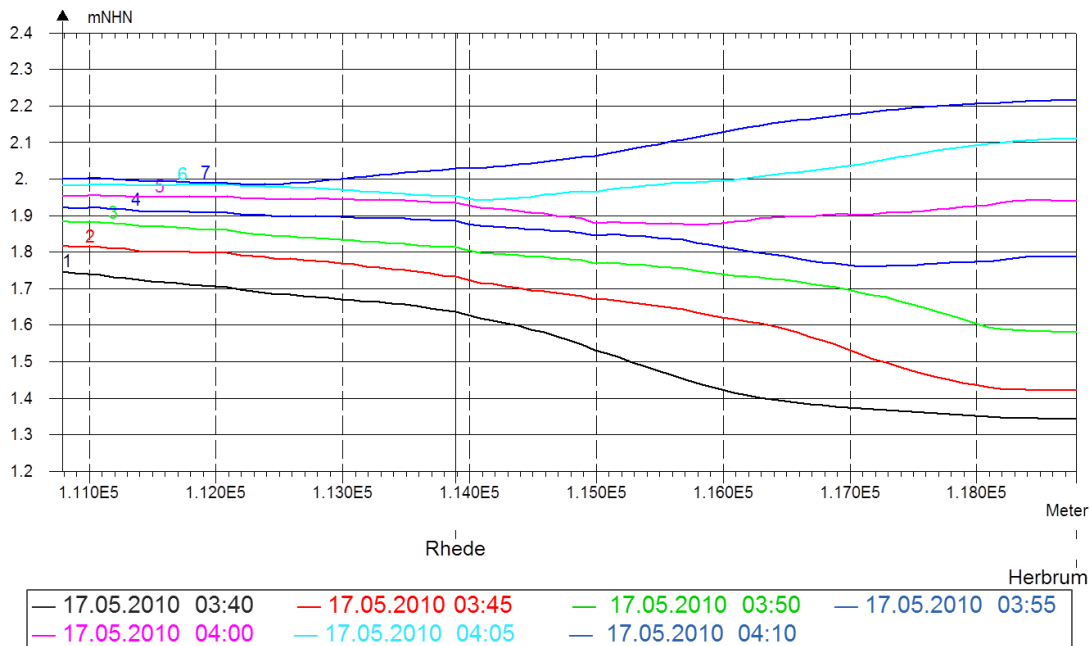


Bild 18: Wasserstände der 4h-Sohlschwelle zu verschiedenen Zeitpunkten im Längsprofil während der Reflektion des Füllschwalls am Wehr Herbrum

Reflektion des Stauschwalls am Wehr Herbrum bei der -1m Schließung

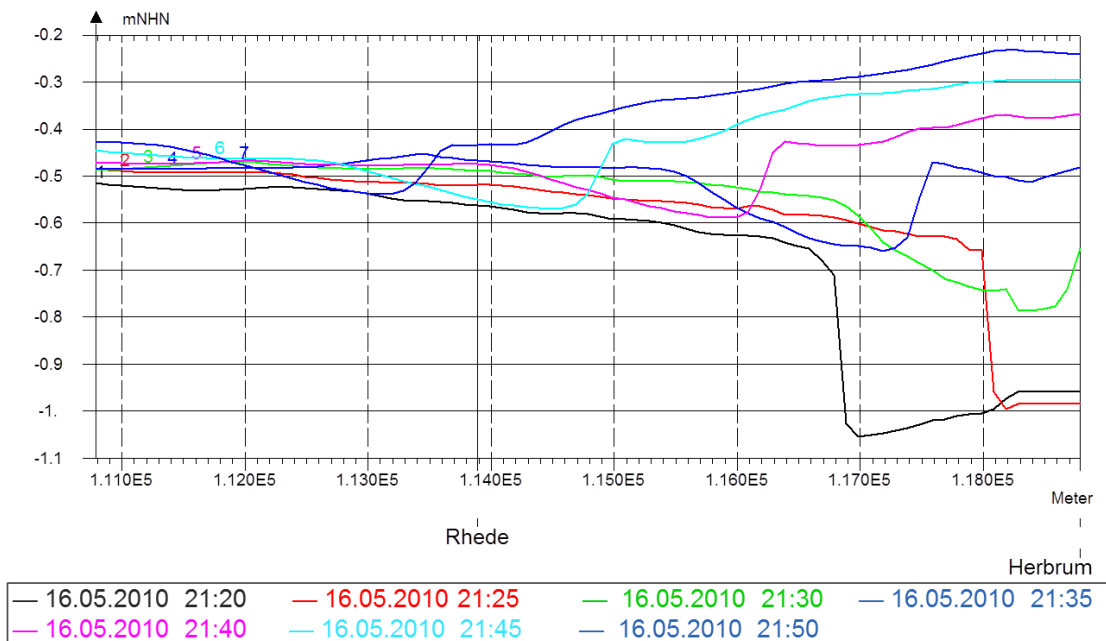


Bild 20: Wasserstände der -1-Schließung zu verschiedenen Zeitpunkten im Längsprofil während der Reflektion des Stauschwalls am Wehr Herbrum

Füllschwall und Entnahmesunk bei der -1m-Schließung

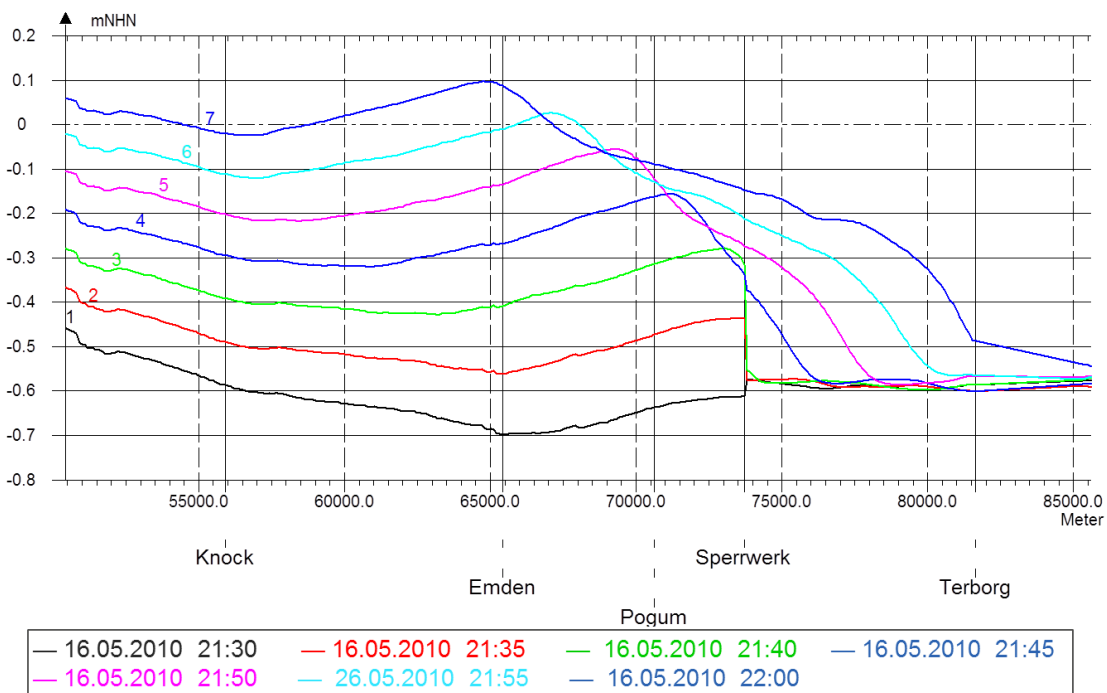


Bild 21: Wasserstände der -1m-Schließung zu verschiedenen Zeitpunkten im Längsprofil beim Sperwerk während des Öffnens der Sperwerkstore.

Polder bei Vellage

Nach dem Ziel- und Bewertungskatalog ist die Verträglichkeit mit anderen Maßnahmen ein bewertungsrelevanter Indikator. Da noch keine detaillierte Planung zu den vorgesehenen Polderflächen vorliegt, wird die prinzipielle Verträglichkeit der 4h-Sohlschwelle und der -1m-Schließung mit Poldern anhand eines fiktiven Beispieldolders bei Vellage untersucht. Der Polder hat eine Fläche von 100ha, die Tiefe wird durchgängig auf NHN-3m festgesetzt (Bild 22). In einem ca. 63m breiten Zufluss zur Ems wurde die Tiefe ebenfalls auf NHN-3m vertieft. Die Umgebungstiefen wurden nicht verändert, so dass ein Austausch von Wasser bei entsprechendem Wasserstand auch außerhalb dieses vertieften Zuflusses möglich ist.

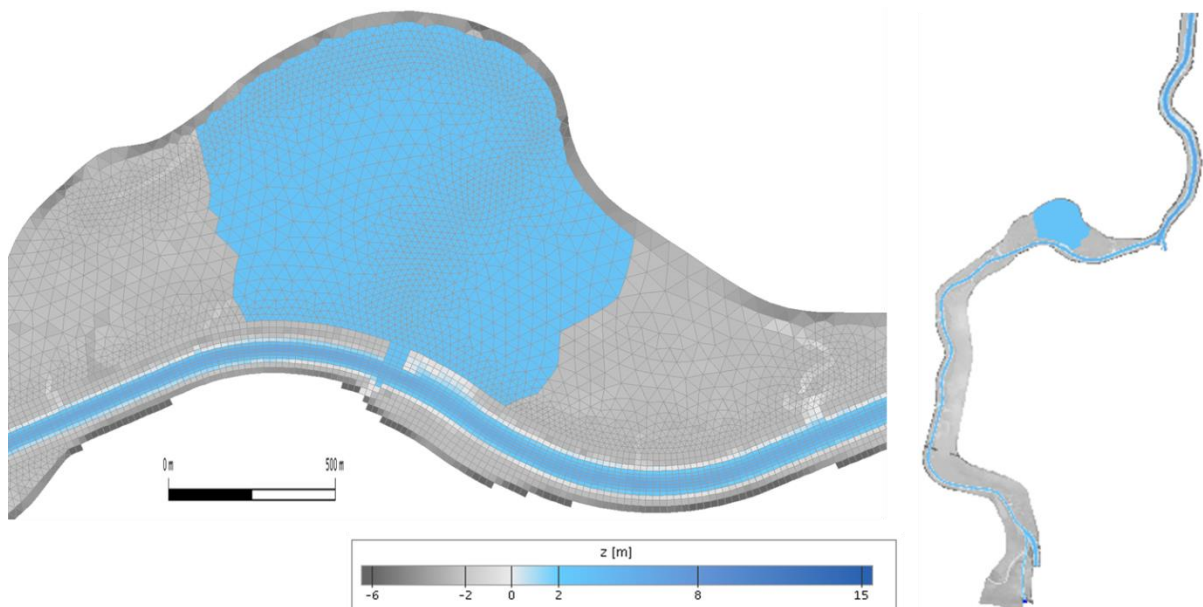


Bild 22: Übersicht Polder Vellage

Der Polder Vellage bewirkt sowohl im Ist-Zustand als auch in Kombination mit der -1m-Schließung eine Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports in der Unterems im Vergleich zur jeweiligen Variante ohne Polder. In Kombination mit der 4h-Sohlschwelle sind die durch den Polder hervorgerufenen Veränderungen des residuellen Schwebstofftransports überwiegend sehr gering, zwischen Ledamündung und Papenburg schwächt der Polder Vellage den ebbstrom-dominanten Netto-Schwebstofftransport ab. Auch in Kombination mit dem Polder Vellage erreicht die -1m-Schließung den residuellen Schwebstofftransport der 4h-Sohlschwelle nicht, so dass die 4h-Sohlschwelle auch mit Polder den besten Netto-Schwebstofftransport aufweist (Bild 23). Stromauf des Polders sind die Unterschiede im residuellen Schwebstofftransport sehr gering.

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

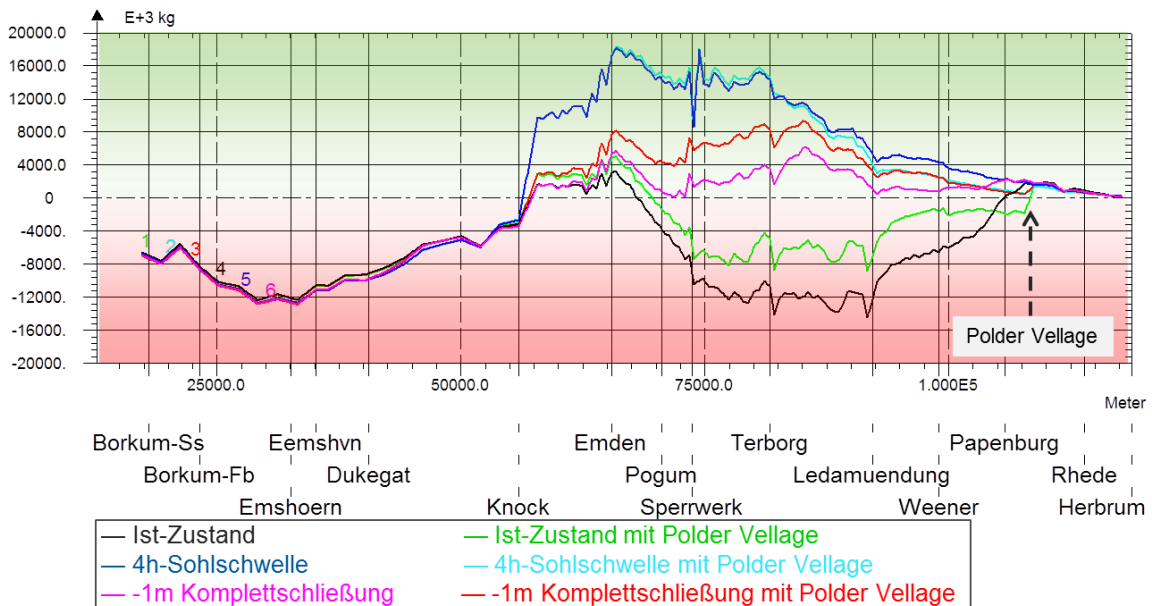


Bild 23: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die 4h-Sohlschwelle und die -1m-Schließung jeweils mit und ohne den Polder Vellage (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Durch den Polder Vellage hervorgerufene Unterschiede im maximalen Salzgehalt sind gering und in Bild 24 vor allem im Ist-Zustand erkennbar. Die in Bild 25 dargestellten Differenzen zeigen, dass der Polder Vellage sowohl im Ist-Zustand als auch in Kombination mit den beiden Varianten dazu führt, dass Salz weiter nach stromab vordringen kann. Diese durch den Polder Vellage hervorgerufene Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems ist im Ist-Zustand am größten. Eine Kombination mit der 4h-Sohlschwelle oder der -1m-Schließung schwächt die vom Polder Vellage ausgelöste Zunahme des maximalen Salzgehalts ab.

Maximaler Salzgehalt

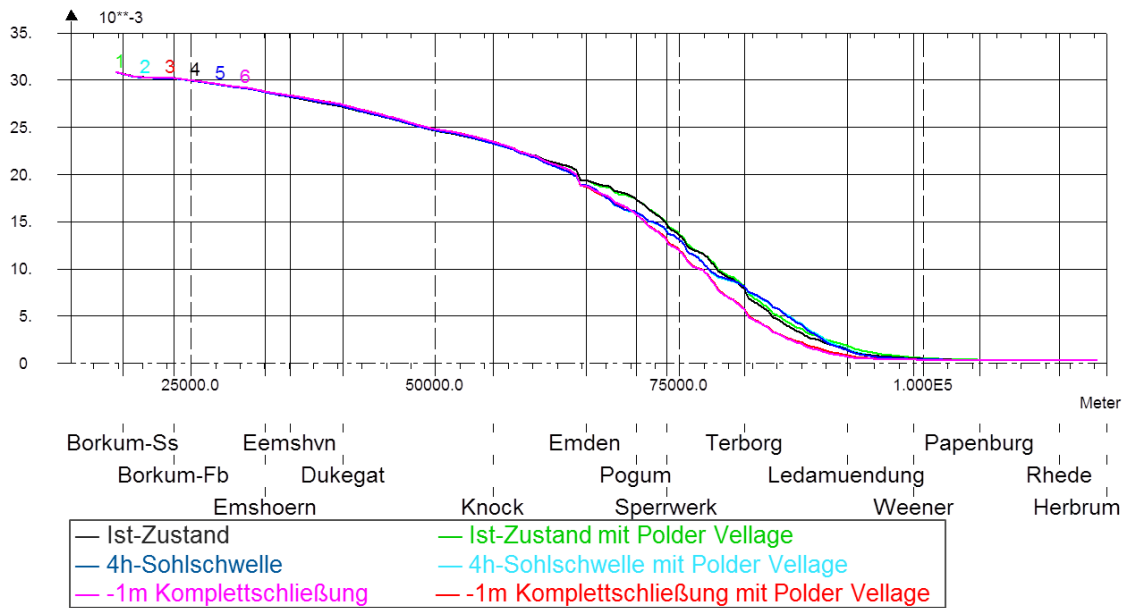


Bild 24: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die 4h-Sohlschwelle und die -1m-Schließung jeweils mit und ohne den Polder Vellage (Querprofil-Mittelung).

Differenz des maximalen Salzgehalts zwischen Variante mit und ohne Polder Vellage

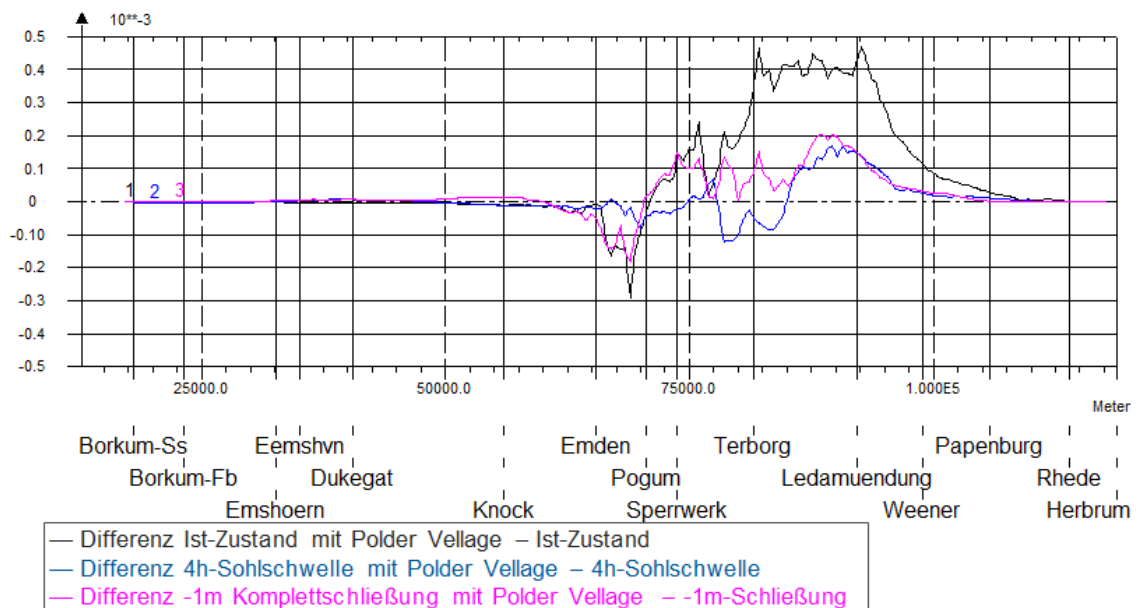


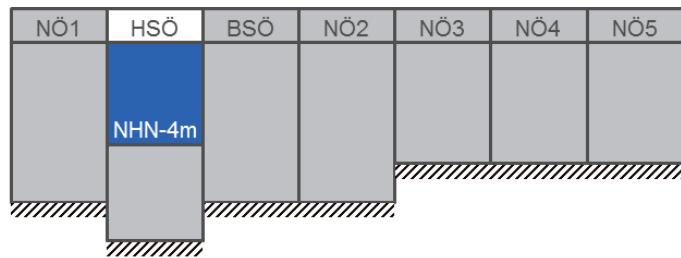
Bild 25: Differenz des maximalen Salzgehalts des Ist-Zustandes, der 4h-Sohlschwelle und der -1m-Schließung jeweils in Kombination mit dem Polder Vellage zur jeweiligen Variante ohne Polder Vellage.

Teilöffnung

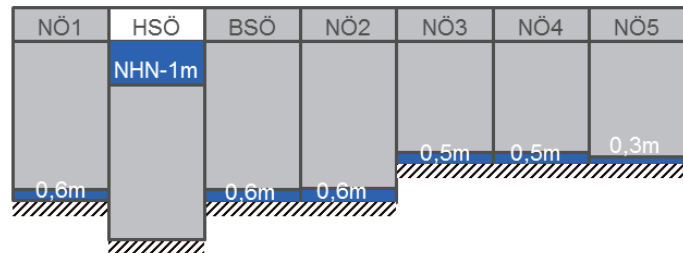
Mit dem Ziel der Reduzierung der sich während der Querschnittseinengung ausbildenden Fahne hoher Strömungsgeschwindigkeiten stromauf des Sperrwerks, werden im Folgenden zwei alternative Torsteuerungen untersucht, welche während der Querschnittseinengung einen Durchfluss über die gesamte Breite des Sperrwerks erlaubt. Für die Realisierung der hierfür nötigen von oben eintauchenden Tore musste eine neuere Modellversion verwendet und das Modellsetup angepasst werden. Die Änderung im Modellsetup führen zu einer größeren vertikalen Durchmischung der Schwebstoffe, weshalb Unterschiede zu den vorherigen Läufen vor allem im Schwebstoffgehalt und Transport auftreten. Die Aussagekraft der Model- lergebnisse auf die Wirksamkeit der Varianten wird hierdurch nicht abgeschwächt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden alle in den folgenden Abbildungen dargestellten Varianten einschließlich des Ist-Zustandes mit diesem neuen Modellsetup gerechnet.

Die Torstellung wird bei den beiden alternativen Torsteuerungen so gewählt, dass der Grad der Querschnittseinengung am Sperrwerk bei einem Wasserstand von 0m NHN ähnlich der 4h-Sohlschwelle ist. Die Variante der Teilöffnung ist der Torsteuerung des NLWKNS sehr ähnlich. Die HSÖ wird komplett geschlossen, die anderen sechs Toren werden unterströmt. Des Weiteren wird eine Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung untersucht. Hierbei ist während der Querschnittseinengung ein Durchfluss durch alle sieben Tore möglich. In der HSÖ entsteht mithilfe des Drehsegmentverschlusses eine Sohlschwelle bei -1m NHN. Die anderen sechs Tore sind teilgeschlossen und werden unterströmt (Bild 26). Die zeitliche Steuerung der Sperrwerkstore ist bei beiden Varianten identisch und entspricht der der 4h-Sohlschwelle. Das Schließen der Tore beginnt mit dem Ebbestromkenterpunkt und dauert 20 Minuten. Vier Stunden nachdem die Tore teilgeschlossen bzw. die Sohlschwelle in den aktiven Zustand versetzt wurde beginnen die Tore zu öffnen. Das Öffnen dauert 1 Stunde.

Sohlschwelle in HSÖ -4m NHN



Teilöffnung + Sohlschwelle in HSÖ -1m NHN



Teilöffnung

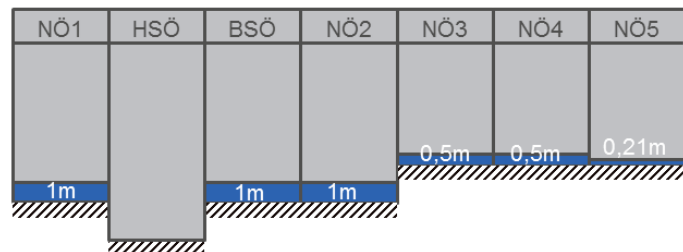


Bild 26: Querschnitt des Emssperrwerks bei aktiver Sohlschwelle (oben), bei einer Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung (Mitte) und bei der Teilöffnung (unten).

Wie die Ergebnisse aus ZANKE (2016) vermuten ließen, reduzieren sich die bei der 4h-Sohlschwelle während der Querschnittseinengung stromauf des Sperrwerks auftretenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten durch die Teilöffnung (Bild 27). Da bei der Teilöffnung kein Durchfluss durch die HSÖ stattfindet, bildet sich hier auch keine Fahne hoher Strömungsgeschwindigkeiten aus. Südlich der Fahrrinne treten aufgrund der unterströmten Tore bei der Teilöffnung höhere maximale Geschwindigkeiten im Vergleich zur 4h-Sohlschwelle und zum Ist-Zustand auf. Da sich der Durchfluss auf eine größere Breite verteilt sind diese Geschwindigkeiten geringer als die maximalen Geschwindigkeiten in der Strömungsfahne der 4h-Sohlschwelle.

Bei der Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung sind die Strömungsgeschwindigkeiten südlich der Fahrrinne geringer als bei der Teilöffnung. Aufgrund des Durchflusses durch die HSÖ bildet sich bei dieser Variante eine Strömungsfahne aus, welche jedoch weder von den maximalen Geschwindigkeiten noch von der Ausdehnung mit der Fahne bei der 4h-Sohlschwelle vergleichbar ist. Geschwindigkeiten größer als 2,1 m/s kommen bei der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle bei dem hier untersuchten Szenario nur direkt bei den Sperrwerkstoren vor (Bild 28). Die maximalen Geschwindigkeiten in direkter Sperrwerksnähe können aufgrund der Auflösung und der Untersuchungskonzeption nicht bestimmt werden. Hinweise, dass die Maximalgeschwindigkeit von 8 m/s (mdl. Mitteilung von Herrn Post 21.11.2016) überschritten werden könnten gibt es derzeit nicht.

Bild 28 stellt die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle im Bereich der vom NLWKN geplanten Sohlsicherung dar. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Farbskala an die in ZANKE (2016) verwendete angepasst. Beim Vergleich dieser Abbildung mit der aus der gutachterlichen Stellungnahme von ZANKE (2016) muss beachtet werden, dass nicht nur die Stellung der Sperrwerkstore eine andere ist, sondern sich auch das Modellsetup unterscheidet unter anderem in der untersuchten Tide.

Für die untersuchte Tide prognostiziert das Modell bei der Teilöffnung Strömungsgeschwindigkeiten von 1,6-1,7 m/s auch außerhalb der geplanten Sohlsicherung, was bei der in ZANKE (2016) untersuchten Variante 4b nicht der Fall ist. Zu beachten ist hierbei, dass die Auflösung und die Untersuchungskonzeption für eine detaillierte räumliche Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten nicht gedacht ist und die in Bild 28 dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten nur erste Hinweise liefern können. Eine detaillierte Untersuchung ist im Zuge der weiteren Planung der Sohlsicherung notwendig.

Bei der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle treten Strömungsgeschwindigkeiten von 2,0-2,1 m/s auch außerhalb der geplanten Sohlsicherung auf. Für diese Variante wäre eine Sohlsicherung, welche sich verstärkt auf den Bereich der Fahrrinne konzentriert, sinnvoller.

Maximale Strömungsgeschwindigkeit während einer Tide

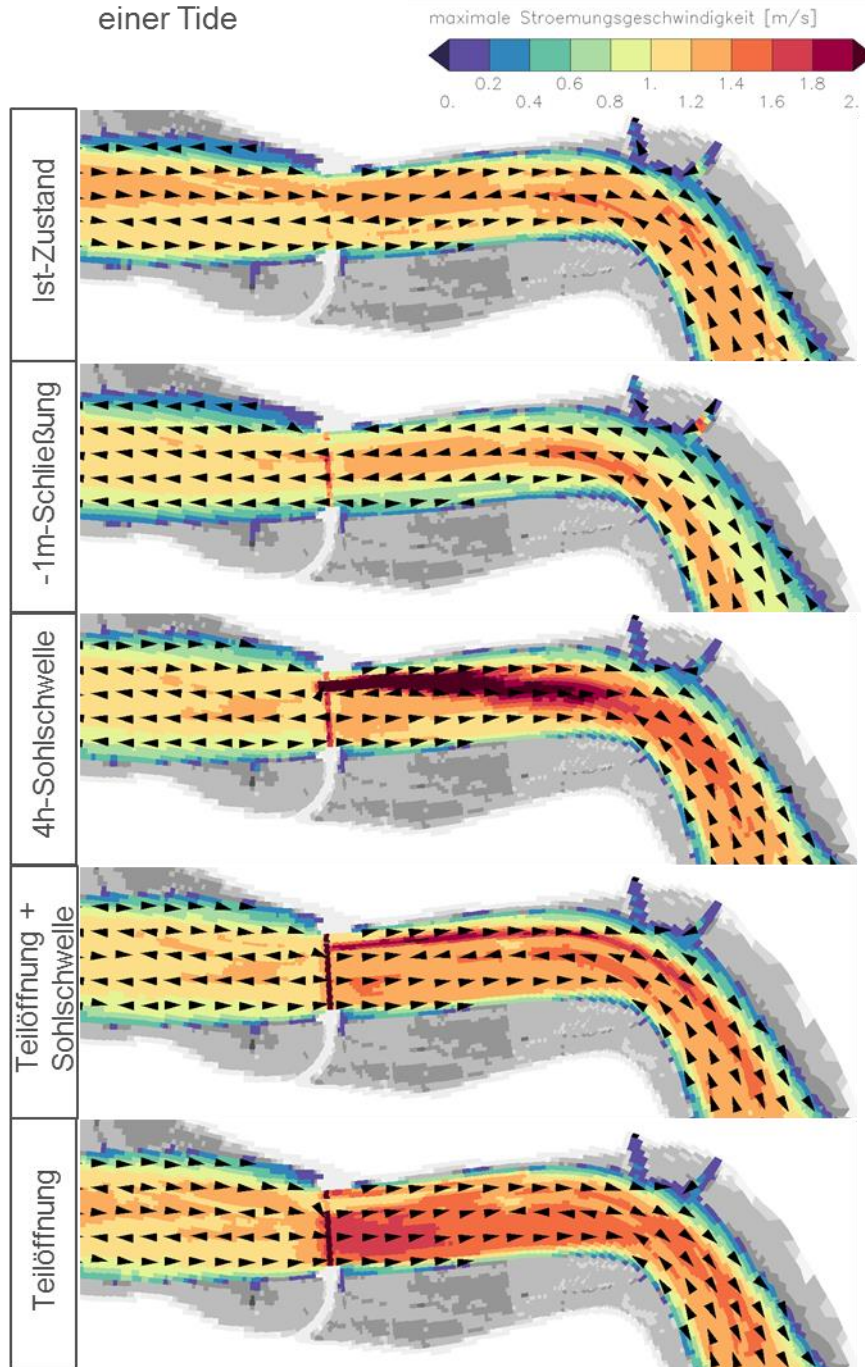


Bild 27: Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während der Tide am 16.5.2010 zwischen 02:30 und 16:00 Uhr für den Ist-Zustand (Oben), die -1m-Schließung (2.v.o), die 4h-Sohlschwelle (Mitte), die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung (2.v.u) und die Teilöffnung (Unten).

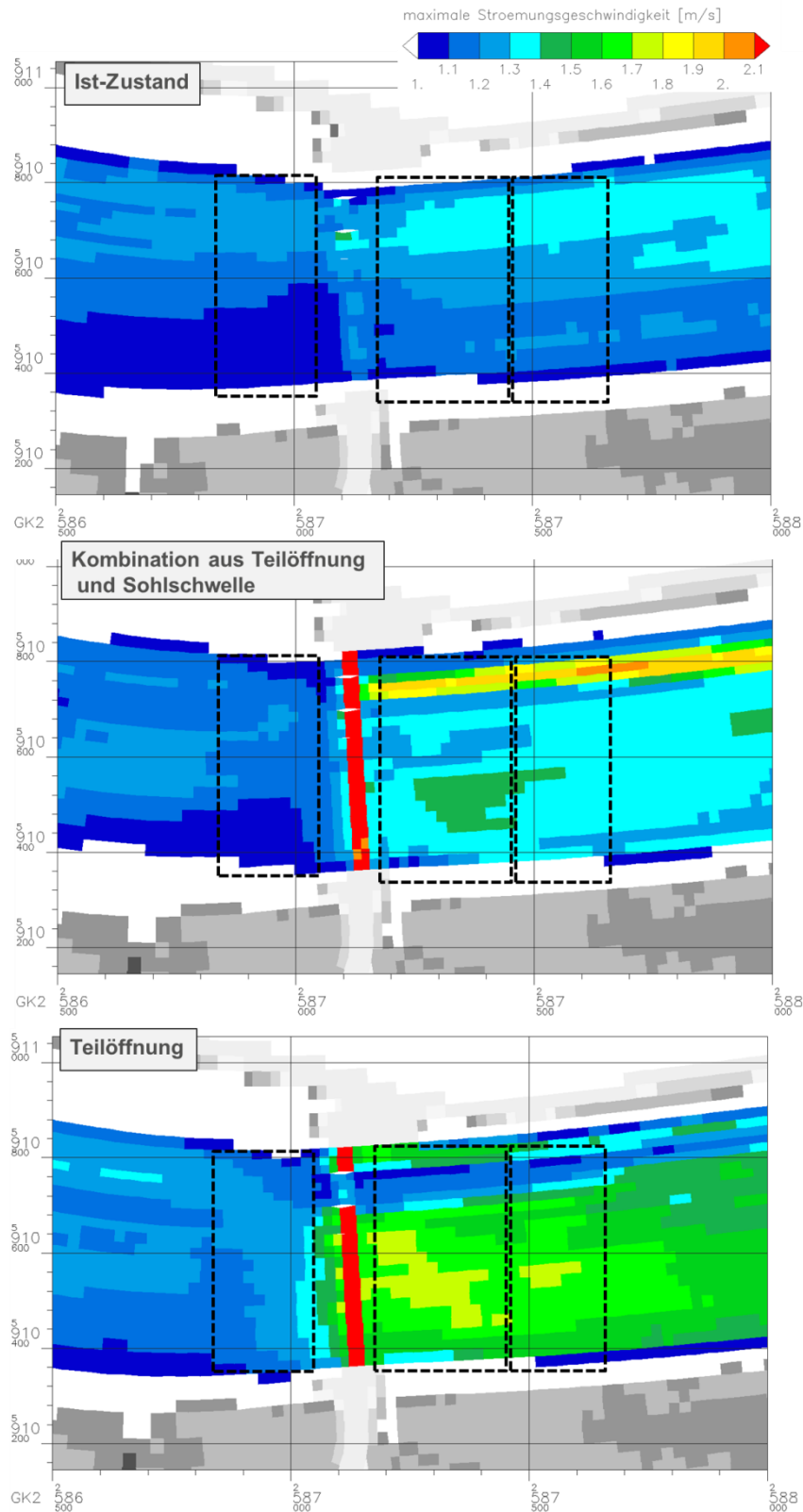


Bild 28: Maximaler tiefengemittelter Strömungsbetrag im Bereich der vom NLKWN geplanten Sohl-sicherung während der Tide am 16.5.2010 zwischen 02:30 und 16:00 Uhr für den Ist-Zustand (Oben), die Kombination aus Teilöffnung und Sohl-schwelle (Mitte) und die Teilöffnung (Unten).

Bild 29 zeigt, dass die Wirksamkeit der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle mit der 4h-Sohlschwelle vergleichbar ist. Bei allen drei Varianten wird in der Unterems und im Emden Fahrwasser ein ebbestrom-dominanter Schwebstofftransport erzielt. Im Dortmund-Ems-Kanal sind die Änderungen sehr gering, der ebbestrom-dominanter Schwebstofftransport bleibt bei allen drei Varianten erhalten. Unter diesen drei Varianten weist die Teilöffnung die beste Transportbilanz auf.

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

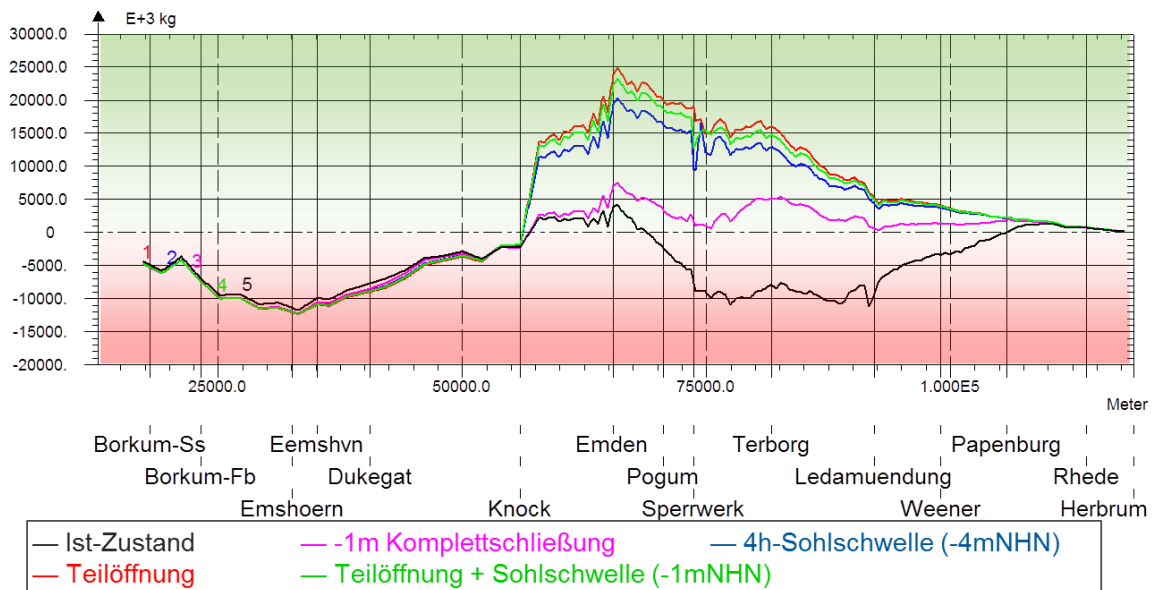


Bild 29: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die -1m-Schließung, die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Unterschiede zwischen den drei Varianten werden durch einen unterschiedlichen Durchfluss am Sperrwerk während der Querschnittseinengung hervorgerufen. Entscheidend für die Wirkung einer Variante ist nicht der Grad der Querschnittseinengung an sich, sondern die hierdurch entstehende Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser des Sperrwerks. Die Wasserstandsdifferenz ist während der Querschnittseinengung bei der Teilöffnung größer als bei der 4h-Sohlschwelle (Bild 30). Dementsprechend ist der Durchfluss während der Querschnittseinengung bei der Teilöffnung kleiner als bei der 4h-Sohlschwelle. Nach dem Öffnen der Sperrwerkstore bewirkt die größere Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser einen größeren Durchfluss bei der Teilöffnung (Bild 31).

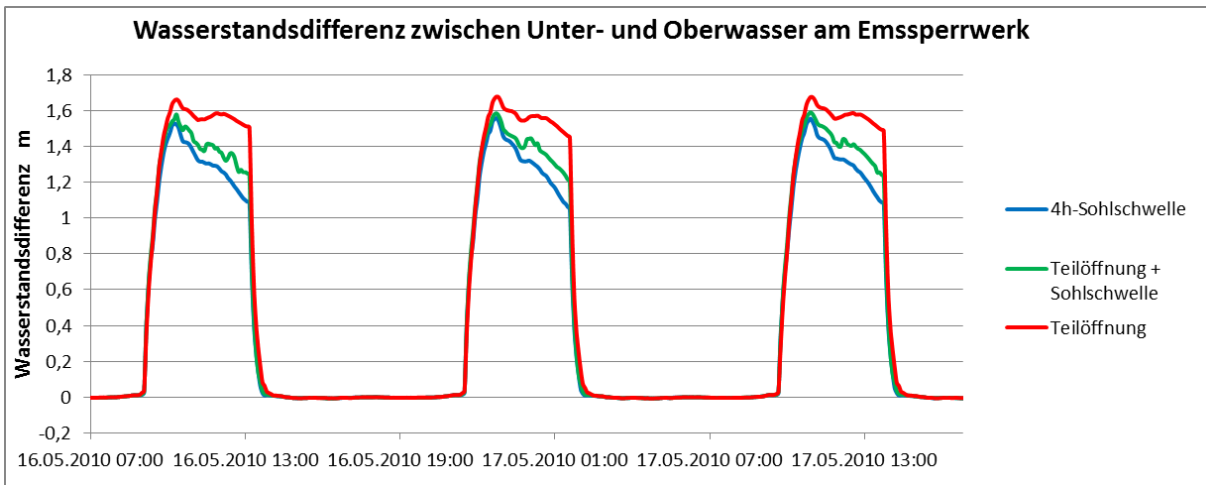


Bild 30: Vergleich der Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser des Emssperrwerks der 4h-Sohlschwelle, der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle und der Teilöffnung während drei Tiden.

Wasserstand Durchfluss beim Sperrwerk

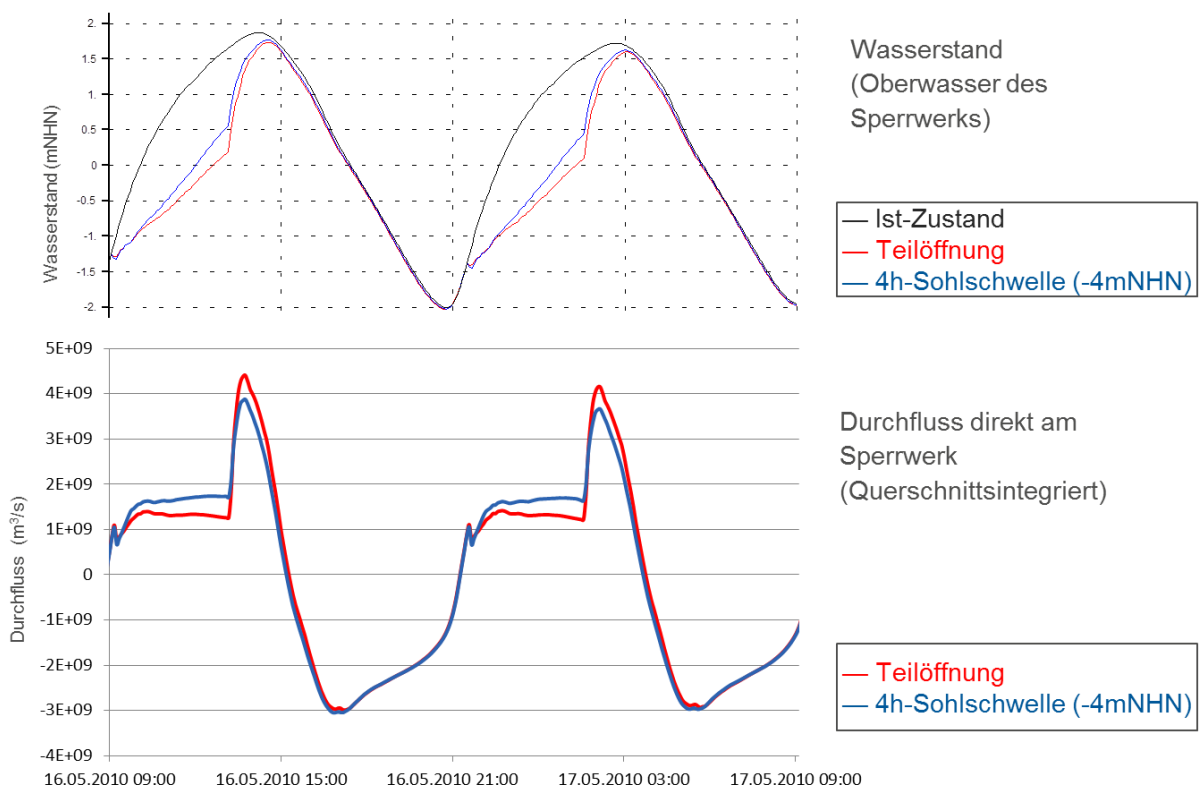


Bild 31: Wasserstand im Oberwasser des Sperrwerks für den Ist-Zustand, die Teilöffnung und die 4h-Sohlschwelle (oben) und der Durchfluss der Teilöffnung und der 4h-Sohlschwelle am Sperrwerk (unten) für zwei Tiden.

Der geringere Durchfluss bei der Teilöffnung führt zu einem etwas niedrigeren mittleren Tidehochwasser und Tidehub zwischen Pogum und Papenburg als bei der 4h-Sohlschwelle. Wie bei der 4h-Sohlschwelle auch wird das Tidehochwasser bei der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle stromauf von Papenburg durch eine Reflektion des Füllschwalls am Wehr in Herbrum angehoben (Bild 32 und Bild 34). Das mittlere Tideniedrigwasser wird bei allen drei Varianten im Vergleich zum Ist-Zustand kaum verändert, da die Querschnittseinengung nur im Flutstrom aktiv ist (Bild 33).

Mittleres Tidehochwasser

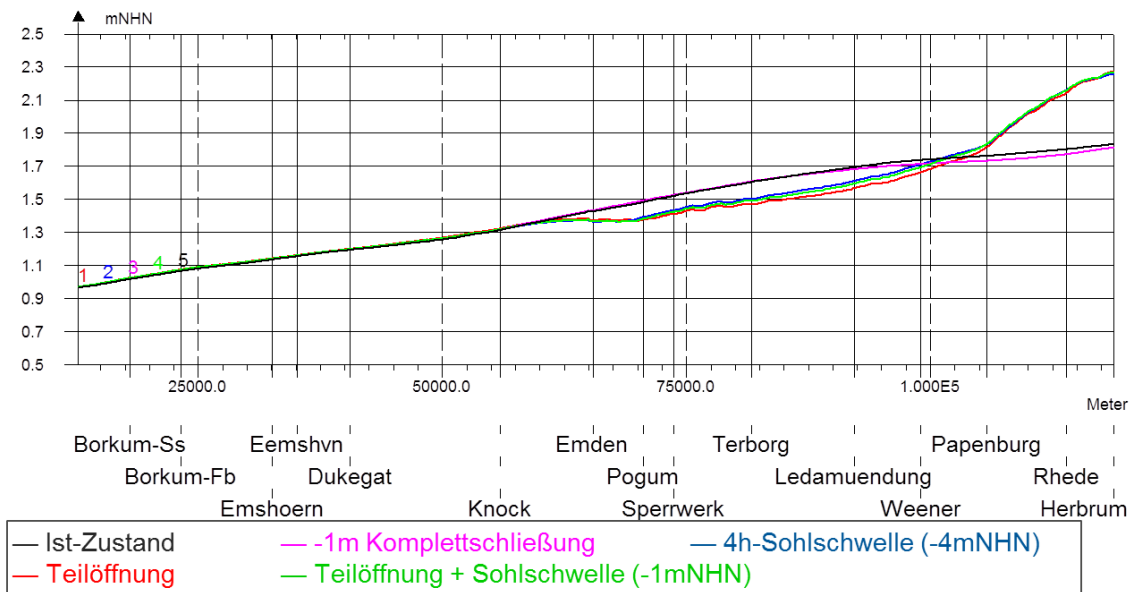


Bild 32: Mittleres Tidehochwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die -1m-Schließung, die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung.

Mittleres Tideniedrigwasser

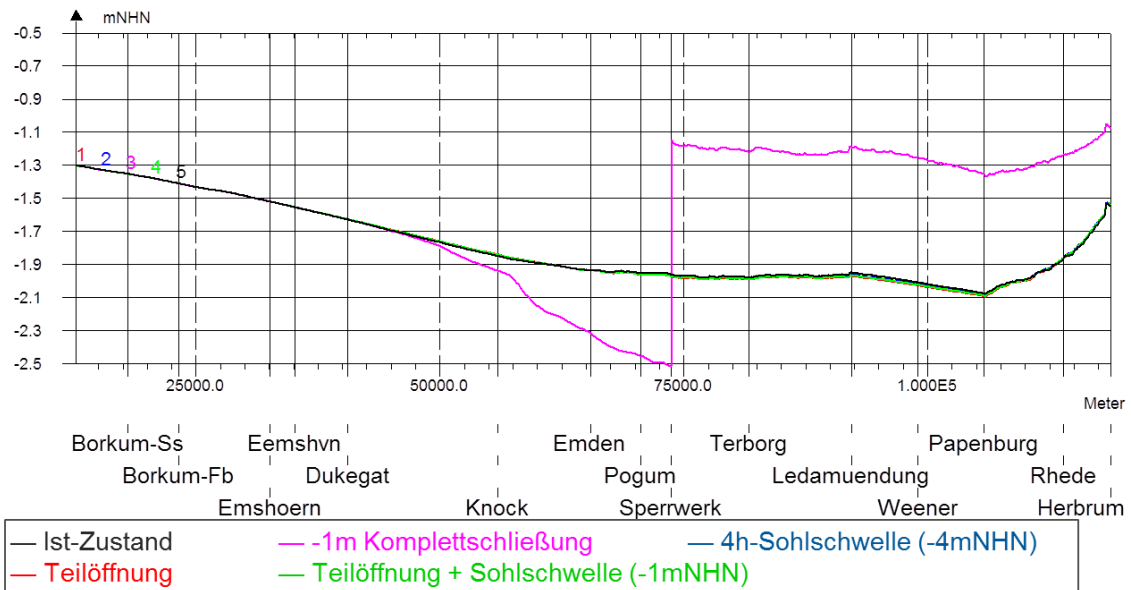


Bild 33: Mittleres Tideniedrigwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die -1m-Schließung, die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung.

Mittlerer Tidehub

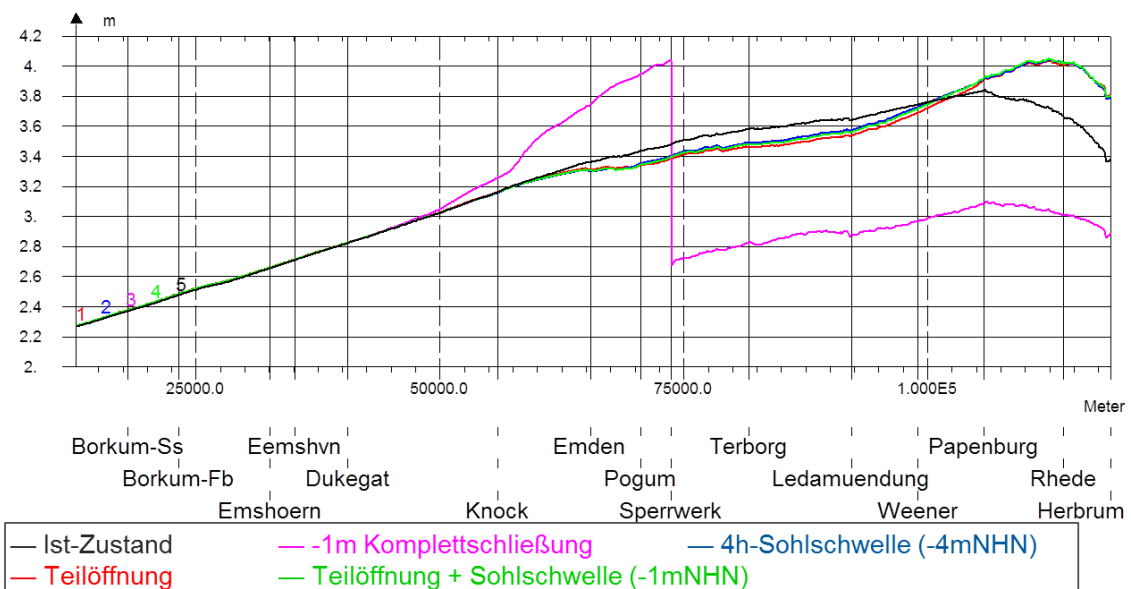


Bild 34: Mittlerer Tidehub in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die -1m-Schließung, die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung.

Die bei der 4h-Sohlschwelle beobachtete Zunahme des maximalen Salzgehalts zwischen Terborg und Ledamündung ist bei der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle nicht vorhanden. Die Abnahme des maximalen Salzgehalts fällt bei diesen beiden Varianten geringer aus als bei der -1m-Schließung (Bild 35).

Maximaler Salzgehalt

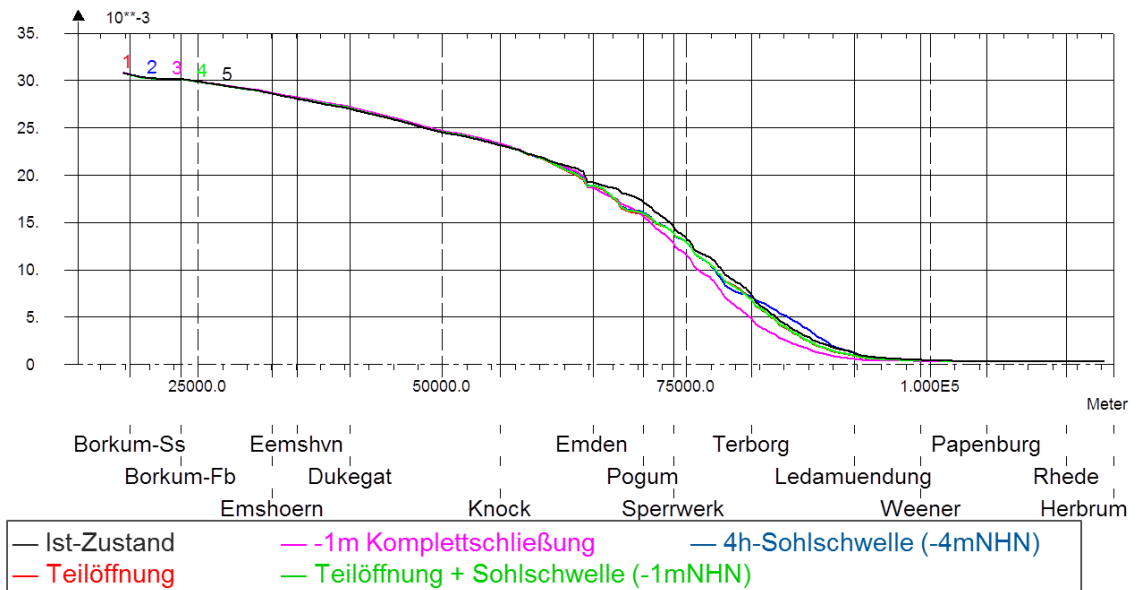


Bild 35: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand, die -1m-Schließung, die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung (Querprofil-Mittelung).

Die Untersuchungen zum Polder Vellage wurden für das neue Modellsetup auch mit der 4h-Sohlschwelle, der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle durchgeführt und die Ergebnisse so überprüft. Für alle drei Varianten bestätigt sich die geringe Veränderung des residuellen Schwebstofftransports durch den Polder (Bild 36).

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

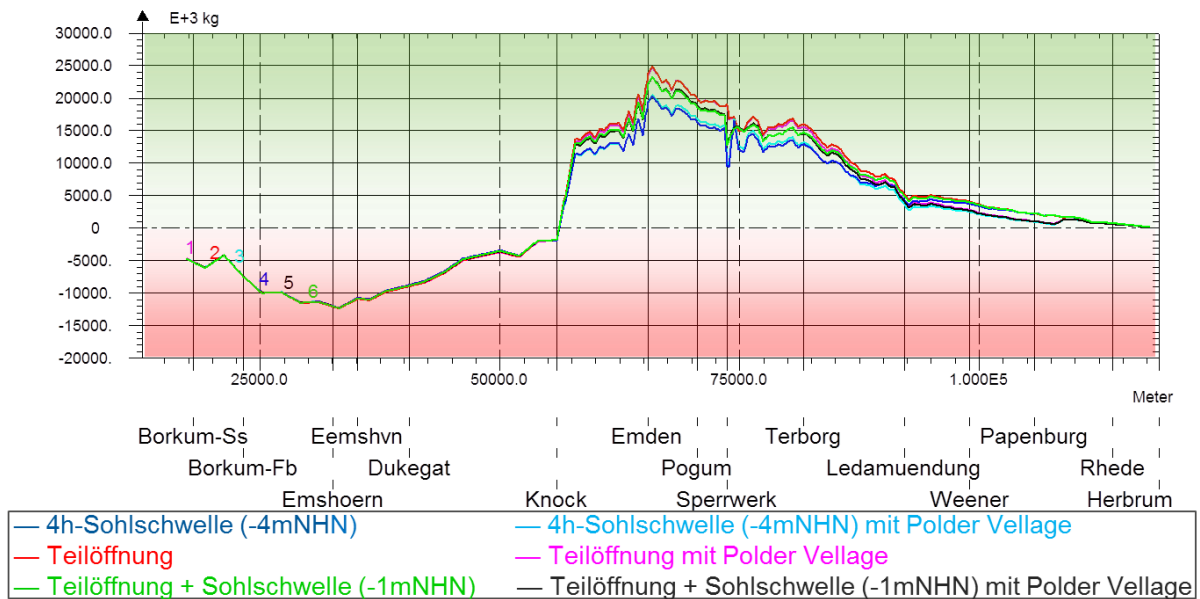


Bild 36: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die 4h-Sohlschwelle, die Kombination aus Sohlschwelle und Teilöffnung und die Teilöffnung jeweils mit und ohne den Polder Vellage (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Oberstrom. Entsprechend zeigen positive Werte (grüner Hintergrund) an, dass der Transport mit dem Flutstrom kleiner ist als der Transport mit dem Ebbestrom. Der residuelle Transport zeigt nach Unterstrom.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die positive Wirkung der 4h-Sohlschwelle und der -1m-Schließung auf den Schwebstofftransport in der Unterems wurde im Ergebnisbericht der BAW (2016) gezeigt und anhand der Wirkung auf die Hydrodynamik erläutert.

In diesem Bericht wurde die Wirksamkeit beider Varianten auch bei verschiedenen Abflussszenarien bestätigt. Auch wenn durch den Abfluss ohne Maßnahme bereits ein ebbstromdominanter Schwebstofftransport in der Unterems gegeben ist, wird dieser durch beide Varianten verstärkt. Beide Maßnahmen sind also nicht nur bei niedrigen Abflüssen zum Umkehren der residuellen Transportrichtung in der Unterems geeignet, sondern können auch die Räumkraft hoher Abflüsse verstärken.

Ein Nachteil der 4h-Sohlschwelle ist die Ausbildung einer Fahne hoher Strömungsgeschwindigkeiten stromauf der Sperrwerks während der Querschnittseinengung. Aufbauend auf den Ergebnissen der gutachterlichen Stellungnahme von ZANKE (2016) wurden deshalb zwei alternative Varianten der 4h-Sohlschwelle untersucht, welche durch eine Verteilung des Durchflusses über die gesamte Breite des Sperrwerks geringere Strömungsgeschwindigkeiten stromauf des Sperrwerks aufzeigen. Die Wirkung dieser beiden Varianten auf den Schwebstofftransport ist mit der Wirkung der 4h-Sohlschwelle vergleichbar. Da auch die Veränderung in der Hydrodynamik und somit das Wirkprinzip vergleichbar ist, ist bei der Teilöffnung und der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle wie bei der 4h-Sohlschwelle auch eine Wirksamkeit bei verschiedenen Abflüssen zu erwarten.

Da die für die Teilöffnung nötige Sohlsicherung nach jetzigem Untersuchungsstand der vom NLWKN geplanten Sohlsicherung näher kommt als die der Kombination aus Teilöffnung und Sohlschwelle empfehlen wir im Folgenden den Fokus anstatt auf die 4h-Sohlschwelle zukünftig auf die Teilöffnung zu legen. Die Sperrzeiten und somit die Auswirkungen auf den Schiffsverkehr entsprechen bei der Teilöffnung denen der 4h-Sohlschwelle, weshalb weiterhin auch die -1m-Schließung als die für die Schifffahrt günstigste Variante mit zu betrachten ist. Auch die durch die -1m-Schließung in Sperrwerksnähe hervorgerufenen Strömungsgeschwindigkeiten sind im Vergleich zur Teilöffnung geringer und somit weiterhin als Vorteil dieser Variante anzusehen.

Die durchgeführten Untersuchungen zum Beispieldolder Vellage zeigen, dass die positive Wirkung der Teilöffnung und der -1m-Schließung auf den Schwebstofftransport auch in Kombination mit dem Beispieldolder Vellage erhalten bleibt. Bei der -1m-Schließung ist sogar eine deutliche Verbesserung des residuellen Transports im Vergleich zu dieser Maßnahme ohne den Polder erkennbar. Zu beachten bleibt jedoch, dass diese Ergebnisse nur erste Hinweise auf die Verträglichkeit der beiden Maßnahmen in Kombination mit einem Polder liefern können. Untersuchungen von strombaulichen Maßnahmen an der Ems haben gezeigt, dass neben der Größe und der Lage eines Retentionsraumes auch die Wassertiefe, die Form sowie der Anschluss des Retentionsraumes an die Ems, bzw. die Leda, die Tide-

dynamik beeinflussen können (BAW 2005b). Das Zusammenwirken der beiden Varianten mit einem Polder muss dementsprechend bei Vorliegen einer detaillierten Planung für jeden Polder individuell überprüft werden. Offen bleibt noch, warum die Teilöffnung durch den Polder Vellage keine mit der -1m-Schließung vergleichbare Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports erfährt. Bei der Untersuchung der Verträglichkeit der Teilöffnung mit einem konkret geplanten Polder sollte diese Frage mit untersucht werden.

Die Teilöffnung und die -1m-Schließung sind aus technischer Sicht reversibel, d.h., dass sie ein- und ausgeschaltet werden können. Das bedeutet auch, dass sie nicht eingeschaltet werden in Fällen des Sturmflutschutzes oder wenn das Emssperrwerk für Schiffsüberführungen genutzt werden soll. So ist gewährleistet, dass die Teilöffnung und die -1m-Schließung die derzeitigen Funktionen des Emssperrwerks nicht negativ beeinträchtigen.

Auf Veränderungen der äußeren Umstände, wie ein steigender Meeresspiegel, kann mithilfe der Flexibilität der beiden Varianten reagiert werden. So ist es möglich, bei der Teilöffnung die Torstellung und so den Durchfluss anzupassen. Bei der -1m-Schließung kann eine Anpassung über eine Veränderung des Wasserstands ab dem das Sperrwerk geschlossen wird erfolgen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in diesem Bericht dargestellten Parameter des Ziel- und Bewertungskatalogs und verweist auf die entsprechenden Abbildungen bzw. Kapitel.

Tabelle 2: Übersicht über die in diesem Bericht dargestellten Parameter des Ziel- und Bewertungskatalogs

Operatives Ziel	Parameter	Bildnummer / Kapitel
(1) Lösung des Schlickproblems	Mittlerer Schwebstofftransport unter Berücksichtigung der saisonalen Variation des Oberwassers	Bild 6, Bild 8, Bild 29
	Schwebstoffgehalt	Bild 10, Bild 11, Bild 12, Bild 13
(2) Verbesserung des Gewässerzustandes (Schlicktransport und Ökologie)	Schwebstoffgehalt	Bild 10, Bild 11, Bild 12, Bild 13
	Salzgehalt	Bild 14, Bild 15, Bild 35
(3) Schaffung / Aufwertung ästuartypischer Lebensräume und Arten zur Erreichung günstiger Erhaltungszustände im Sinne der entsprechenden Richtlinien	MThw	Bild 32
	MTnw	Bild 33
	MThb	Bild 34
Verträglichkeit mit anderen Maßnahmen des Masterplans	Polder	Bild 23, Bild 24, Bild 36 Kapitel Zusammenfassung und Schlussfolgerung
Widerstandsfähigkeit der Maßnahme gegen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs		Kapitel Zusammenfassung und Schlussfolgerung
Anpassungsfähigkeit / Nachsteuerungsmöglichkeit		Kapitel Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Literaturverzeichnis

- BAW (2005a): SediMorph Validierungsdokument, Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau, Web-Adresse http://wiki.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf, zuletzt geprüft am 15.4.2016
- BAW (2005b): Verminderung der Baggerkosten an der Ems. Untersuchungskonzeption für strombauliche Maßnahmen. Stellungnahme. Schaffung von zusätzlichen Retentionsräumen und Untersuchung des Drei-Kurven-Bereichs – 5.03.10063, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
- BAW (2010): Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems – Bericht zur vertieften Wirkanalyse – Bericht BAW A3955 03 10143, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
- BAW (2012): Vertiefung der Außenems bis Emden – Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang – Gutachten BAW A3955 03 10144, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
- BAW (2015): Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems – FuE-Abschlussbericht BAW A3955 03 70211, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
- BAW (2016): Ergebnisbericht über die Wirkung einer dauerhaften und flexiblen Sohlschwelle und eines um Tideniedrigwasser geschlossenen Emssperrwerks Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems – B3955.03.12.10234, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.
- BOLLRICH, G. & AIGNER, D. (2015): Handbuch der Hydraulik für Wasserbau und Wasserwirtschaft
- CASULLI, V. & WALTERS, R. A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations, International journal for numerical methods in fluids, 32 (3), S. 331-348.
- CASULLI, V. & ZANOLLI, P. (2002): Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems, Mathematical and computer modelling, 36 (9), S. 1131-1149.
- ZANKE, U. (2016): Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Sohlensicherung und Kolkbildung am Emssperrwerk bei Betriebsfällen zur Tidebeeinflussung

Erläuterungen zu den Tidekennwerten

(siehe auch DIN 4049-3)

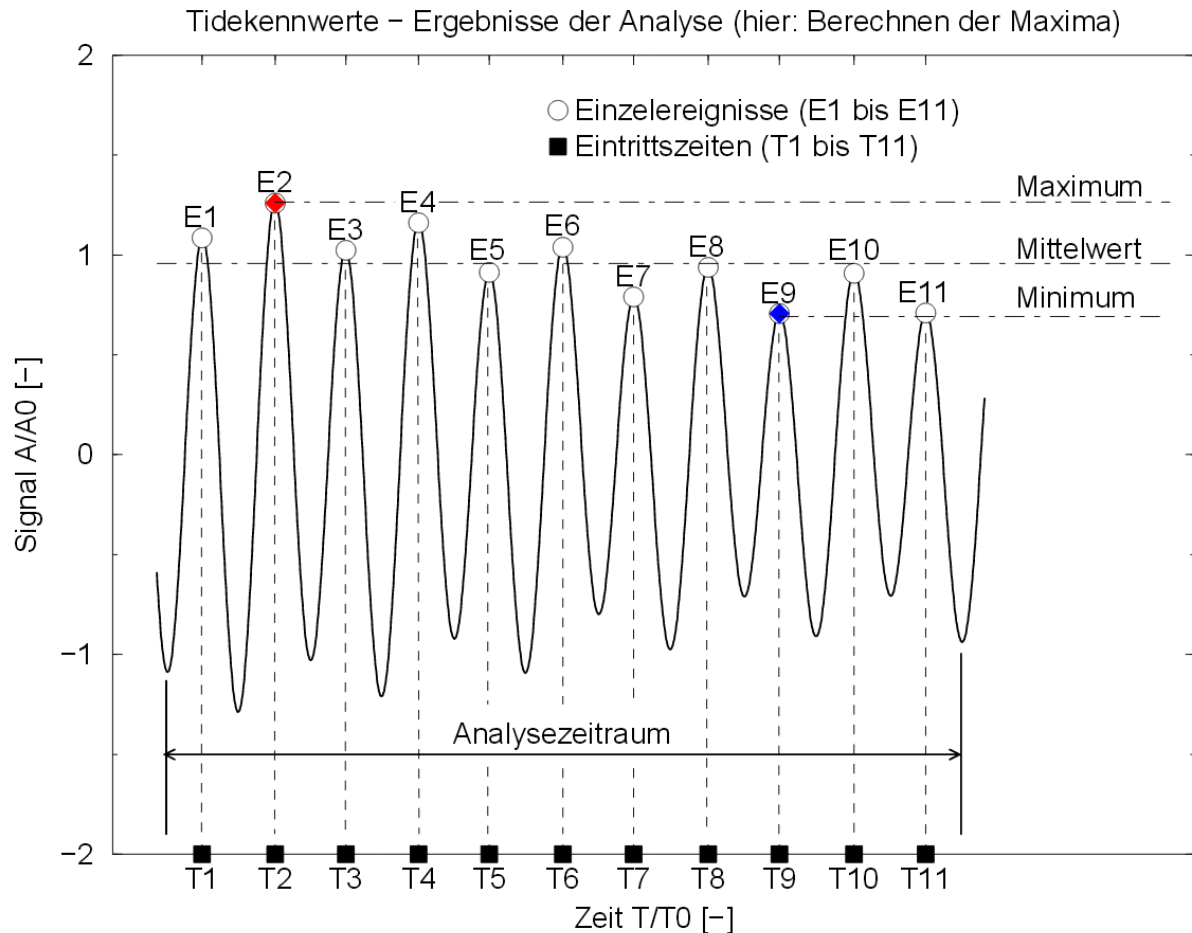


Bild 37: Maximum, Mittelwert u. Minimum des Analysezeitraums

Mittelwert des Analysezeitraums: Ein für den jeweiligen Parameter für den Analysezeitraum errechneter lokaler Mittelwert

Minimalwert des Analysezeitraumes: Ein für den jeweiligen Parameter für den Analysezeitraum errechneter lokaler Minimalwert

Maximalwert des Analysezeitraumes: Ein für den jeweiligen Parameter für den Analysezeitraum errechneter lokaler Maximalwert

Erläuterungen zu Tidekennwerten des Schwebstoffgehalts und -transports

Mittlerer Schwebstoffgehalt: Mittelwert des Schwebstoffgehalts während einer Tide (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebbestromkenterungen)

Maximaler Schwebstoffgehalt: Maximalwert des Schwebstoffgehalts während einer Tide (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebbestromkenterungen)

Advektiver Schwebstofftransport: Der advektive Schwebstofftransport ist die Bewegung der Schwebstoffe mit der Strömung. Mathematisch ist es das Produkt aus dem Schwebstoffgehalt c und der Strömung u an einen beliebigen Ort. Bei dem resultierenden Transport TP handelt sich um die Masse der Schwebstoffe, die pro Sekunde und pro m^2 transportiert wird:

$$TP(x, y, z, t) = c(x, y, z, t) u(x, y, z, t)$$

Die in dieser Machbarkeitsstudie dargestellten Ergebnisse sind in zwei Schritten weiter bearbeitet worden: Zuerst sind die Transporte über definierte Querprofile (Bild 40) integriert worden, so dass nach der Integration über die Querschnittsfläche A der Querprofile der Massentransport TP_{QP} der Schwebstoffe pro Sekunde als Zeitreihe getrennt für jedes Querprofil vorliegt:

$$TP_{QP}(t) = \int_{QP} c u dA_{QP} \approx \sum_i c_i u_i \Delta A_i \quad \forall \text{ Punkte } i \text{ eines Querprofils}$$

Dabei ist zu beachten, dass nur der Anteil der Strömung u berücksichtigt wird, der orthogonal zur Querschnittsfläche ΔA_i ist.

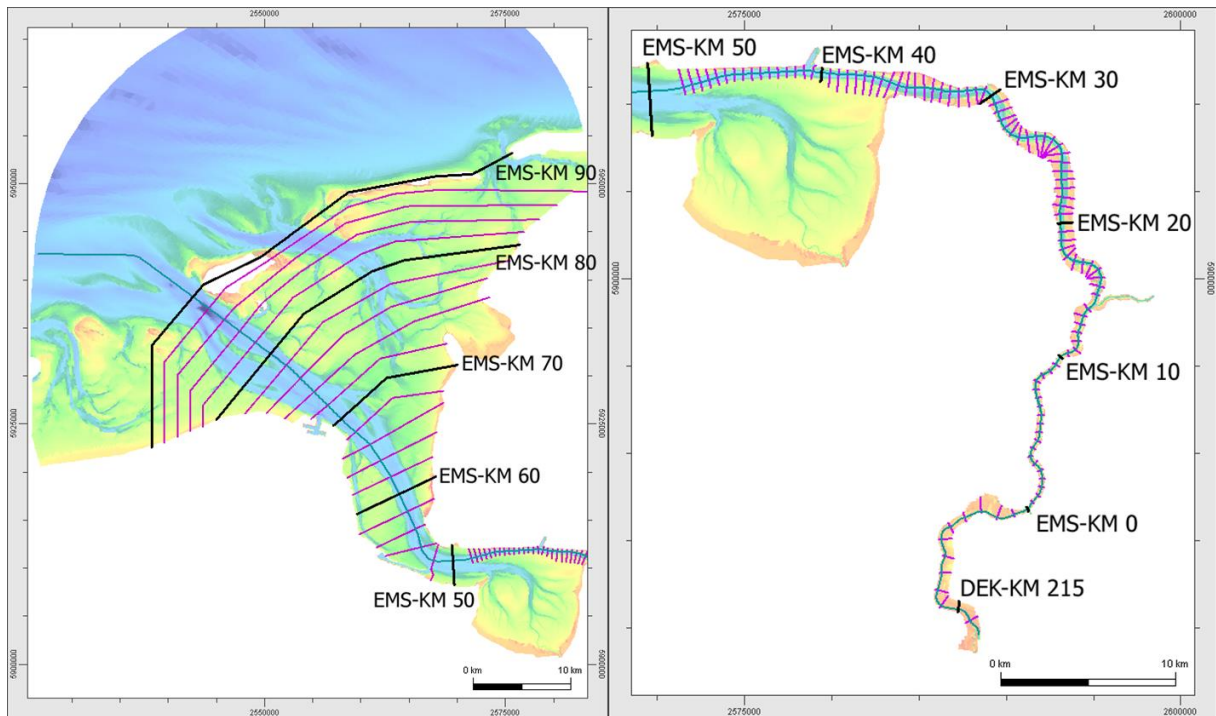


Bild 40: Lage der definierten Querprofile in der Außenems (links) und Unterems (rechts).

Im letzten Schritt der Analyse werden die Querprofil-Schwebstofftransport-Zeitreihen über die Dauer der Flutströmung, bzw. Ebbeströmung integriert:

$$\text{Flut-}TP_{QP} = \int_{K_e}^{K_f} TP_{QP}(t) dt \approx \sum_j TP_{QP_j} \Delta t_j \quad \forall \text{ Zeitpunkte } j \text{ des Flutstroms}$$

$$\text{Ebbe-}TP_{QP} = \int_{K_f}^{K_e} TP_{QP}(t) dt \approx \sum_k TP_{QP_k} \Delta t_k \quad \forall \text{ Zeitpunkte } k \text{ des Ebbestroms}$$

Das Resultat ist die Masse der Schwebstoffe, die während einer Flutstrom- oder Ebbestromdauer durch die Querschnittfläche eines Querprofils transportiert wird. K_e und K_f sind die Eintrittszeiten der Ebbestrom- und Flutstromkenterung, markieren also den Beginn des Flutstroms, bzw. des Ebbestroms. Δt ist der zeitliche Abstand zwischen zwei Stützstellen der zuvor ermittelten Querprofil-Schwebstofftransport-Zeitreihe TP_{QP} .

Residueller Schwebstofftransport: Der residuelle Schwebstofftransport ist die Differenz zwischen dem advektiven Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom und dem advektiven Schwebstofftransport mit dem Flutstrom. Der residuelle Schwebstofftransport kann auch als Netto-Transport bezeichnet werden. Das Vorzeichen zeigt an, ob der Transport mit dem Ebbestrom größer ist als der Transport mit dem Flutstrom (+) oder ob der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit dem Ebbestrom (–)