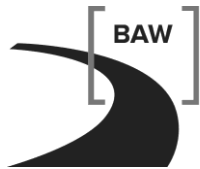


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Masterplan Ems 2050

**Hier: Ergebnisbericht
über die Wirkung
einer dauerhaften und flexiblen Sohl-
schwelle und eines um Tideniedrigwasser
geschlossenen Emssperrwerks**

Auftragsnummer B3955.03.12.10234



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Masterplan Ems 2050
Ergebnisbericht
über die Wirkung
einer dauerhaften und flexiblen Sohlschwelle und
eines um Tideniedrigwasser geschlossenen
Emssperrwerks

Auftraggeber: WSA Emden

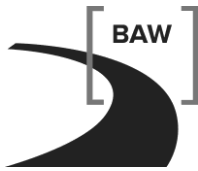
Auftrag vom: 1.10.2014, Az.: 231.2/UnEm796 SA1 UA1

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.12.10234

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: K3 – Ästuarsysteme II
Bearbeiter: M.Sc. Marissa Albers, Dipl.-Ing. (FH) Jens
Jürges

Hamburg, im April 2016

Der Ergebnisbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

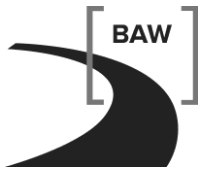


Zusammenfassung

Entsprechend der Ziele des Masterplans Ems 2050 ist das Hauptaugenmerk zu Beginn der Studien zunächst auf die Lösung des Schlickproblems in der Unterems gelegt worden. Hauptkriterium zur Beurteilung ist im Wesentlichen der Tidekennwert des residuellen Schwebstofftransports, also der Differenz des Schwebstofftransports mit dem Flutstrom minus Ebbestrom. Hierbei zeigt eine dauerhafte, feste Sohlschwelle im Bereich des heutigen Sperrwerks Potential, den residuellen Schwebstofftransport vorteilhaft zu beeinflussen. Zur Gewährleistung eines weiteren Zieles des Masterplans, die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsweges Bundeswasserstraße Ems, wäre bei der Realisierung einer dauerhaften Sohlschwelle der Bau einer Schleuse nötig, weil die dauerhafte Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist. Deshalb ist im weiteren Prozess eine flexible Sohlschwelle untersucht worden, die den Querschnitt am Emssperrwerk nicht dauerhaft, sondern nur zu bestimmten Tidephasen einschränkt. Zu den anderen Tidephasen ist Schiffsverkehr möglich. Hierbei stellt sich zunächst die Frage, ob eine flexible Sohlschwelle nur im Ebbe- oder nur im Flutstrom betrieben werden sollte: Im Ergebnis führt nur die Einengung des Querschnitts im Flutstrom zu einer Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports im Vergleich zur dauerhaften Sohlschwelle. Um die Einschränkungen für die Schifffahrt weiter zu verringern, ist die flexible Sohlschwelle nicht im gesamten Flutstrom aktiviert worden, sondern nur für 2, 3, 4, 5 oder 6 Stunden. Optimal bezüglich des residuellen Schwebstofftransports ist eine Dauer von 4 Stunden. Neben der Wirkung auf den residuellen Schwebstofftransport und der Gewährleistung des Schiffsverkehrs ist als weiterer Aspekt auch die technische Realisierbarkeit der Maßnahme zu beachten. Als Arbeitshypothese ist die Nutzung des bestehenden Emssperrwerks vorgesehen. Die flexible Sohlschwelle ist in diesem Bericht daher so ausgelegt, dass sie prinzipiell ohne Umbau des Emssperrwerks realisiert werden kann, was jedoch noch an anderer Stelle geprüft und entschieden werden muss. Es stellen sich Fragen, wie z.B. nach der Belastung des Bauwerks im Sohlschwellenbetrieb oder nach den Umbaukosten. Die flexible Sohlschwelle wird mittels des vorhandenen Drehsegmentverschlusses nur in der Hauptschiffahrtsöffnung (HSÖ) realisiert. Alle weiteren Sperrwerkstore sind während der Dauer des Sohlschwellenbetriebs geschlossen. Das führt im Sohlschwellenbetrieb allerdings zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten an der HSÖ sowie stromab davon. Die Standsicherheit des Emssperrwerks ist für den Lastfall des Sohlschwellenbetriebs daher noch nachzuweisen. Diesbezüglich bietet die letzte untersuchte Variante, die komplette Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser, einen Vorteil: Ein Umbau des Emssperrwerks ist ggf. nicht notwendig, hohe Strömungsgeschwindigkeiten werden in Bauwerksnähe aber vermieden.

Beim Vergleich mit dem Ist-Zustand zeigen folgende Varianten positive Auswirkungen auf den residuellen Schwebstofftransport, wobei die Reihenfolge den Grad der Beeinflussung wiedergibt, beginnend mit dem höchsten Einfluss:

1. Flexible Sohlschwelle im Flutstrom: Die optimale Transportbilanz wird durch die Minimierung der Abnahme des Tidevolumens bei gleichzeitiger Maximierung der Verlängerung der Flutstromdauer erzielt. Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom sollte einerseits nicht während des gesamten Flutstroms aktiv sein, um eine zu starke Reduzierung des Tidestromvolumens zu vermeiden und andererseits nicht zu kurz aktiv sein, um eine ausreichende Verlängerung der Flutstromdauer zu erzielen. Bei den hier untersuchten Varianten besitzt die flexible Sohlschwelle über eine Dauer von 4 Stunden den größten positiven Effekt auf den residuellen Schwebstofftransport. Die gewählte Sohlschwelle ist so ausgelegt, dass sie ohne Umbau des Emssperrwerks prinzipiell realisierbar ist, aber es stellen sich hierbei im Sohlschwellenbetrieb so hohe Strömungsgeschwindigkeiten ein, dass die Standsicherheit des Emssperrwerks im Sohlschwellenbetrieb noch an anderer Stelle geprüft werden muss. Zur Vermeidung von zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten müsste die flexible Sohlschwelle verbreitert werden. Dies bedeutet, dass ein Umbau oder ein ergänzender Bau am Emssperrwerk notwendig wird. Es ist zu erwarten, dass eine breitere flexible Sohlschwelle zu einem veränderten residuellen Schwebstofftransport führt und dass ggf. die optimale Dauer des Sohlschwellenbetriebs von den hier erzielten Ergebnissen abweicht.
2. Bei der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser ist die Verkürzung der Ebbestromdauer bei kaum veränderter Flutstromdauer entscheidend für die geänderte Sedimentdynamik. Sich kaum verändernde Wasserstände und somit sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten zur Ebbestromkenterung zusammen mit einem geringeren Tidestromvolumen führen zu abnehmenden Flutstrom- und nahezu unveränderten Ebbestromgeschwindigkeiten und im Resultat zu einem ebbestrom-dominanten Schwebstofftransport in der Unterems und im Emders Fahrwasser. Die 4h-Sohlschwelle im Flutstrom führt im Gegensatz zu dieser Variante neben der Verkürzung der Ebbestromdauer auch zu einer Verlängerung der Flutstromdauer und zu einer geringeren Reduzierung des Tidestromvolumens, was insgesamt ein besseres Verhältnis der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten und somit eine bessere Schwebstofftransportbilanz zur Folge hat. Wie die flexible Sohlschwelle in der hier untersuchten Form ist auch diese Variante ggf. ohne Umbau des Emssperrwerks realisierbar. Der Vorteil der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser im Vergleich zur flexiblen Sohlschwelle ist, dass hohe Strömungsgeschwindigkeiten insbesondere in Bauwerksnähe im Bereich der Sohlschwelle vermieden werden.
3. Die dauerhafte Sohlschwelle führt zu einer Abnahme des residuellen Stromauf-Transports, streckenweise wird dieser auch in einen Stromab-Transport gekehrt. Dies stellt hinsichtlich der Schwebstoffbilanz eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand dar, aber die Transportbilanzen einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom und der zeitweise kompletten Schließung im Ebbestrom werden nicht erreicht. Wie die flexible Sohlschwelle im Flutstrom wird auch die dauerhafte Sohlschwelle zu ei-

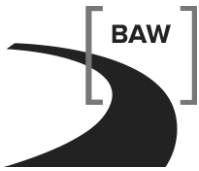


ner Verspätung des Flutstromkenterpunktes führen. Da aber die dauerhafte Sohlschwelle im Gegensatz zur flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom auch im Ebbstrom den Querschnitt einengt, wird sich auch der Ebbestromkenterpunkt verspäten und die Verlängerung der Flutstromdauer fällt bei der dauerhaften Sohlschwelle geringer aus. Nachteilig ist, dass die dauerhafte Sohlschwelle nur durch einen ergänzenden Anbau in der Nähe zum Emssperrwerk realisiert werden kann und dass die ununterbrochene Querschnittseinengung zu einer eingeschränkten ökologischen Durchgängigkeit führt. Weiterhin wäre der Bau einer Schleuse für die Schifffahrt erforderlich, weil die dauerhafte Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist.

Neben den Optimierungs- und Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Varianten muss zur abschließenden Beurteilung noch deren langfristige Wirksamkeit untersucht werden. Hier ist vor allem die Entwicklung der Salzintrusion und des Schwebstoffgehalts und -transports zu betrachten. Des Weiteren muss der Frage nachgegangen werden, wo die aus der Unterems heraus transportierten Sedimente abgelagert werden. Es wird erwartet, dass der Dollart einen erhöhten Schwebstoffeintrag erfährt, weil alle untersuchten Varianten den Stromauf-Transport von Schwebstoffen in der Außenems bis zum Dollart nicht nennenswert verändert haben. Mit Blick auf den Klimawandel muss die Wirksamkeit der verschiedenen hier betrachteten Varianten bei steigendem Meeresspiegel und geänderten Abflüssen noch weiter untersucht werden

(1) Titel		Masterplan Ems 2050 – Ergebnisbericht über die Wirkung einer dauerhaften und flexiblen Sohlschwelle und eines um Tideniedrigwasser geschlossenes Emssperrwerk	
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer	
Außen- und Unterems und Dortmund-Ems-Kanal	1100	von	bis
		DEK-KM 213	Ems-KM 113
(5) Unterzeichner	RDir Dr. N. Winkel		
(6) Bearbeiter	M.Sc. M. Albers, Dipl.-Ing. (FH) J. Jürges		
(7) Mitarbeiter			
(8) Auftraggeber	WSA Emden Am Eisenbahndock 3, 26725 Emden		
(9) Auftrags-Nr.	B3955.03.12.10234	(10) aufgestellt am	22. April 2016
(11) Seitenzahl	109	(12) Sonderhinweise	
(13) Kurzfassung			
<p>Entsprechend der Ziele des Masterplans Ems 2050 wurde das Hauptaugenmerk zu Beginn der Studien zunächst auf die Lösung des Schlickproblems in der Unterems gelegt. Hauptkriterium zur Beurteilung ist der Tidekennwert des residuellen Schwebstofftransports. Hierbei zeigte eine dauerhafte Sohlschwelle Potential, den residuellen Schwebstofftransport vorteilhaft zu beeinflussen. Zur Gewährleistung eines weiteren Zieles des Masterplans, die Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsweges Bundeswasserstraße Ems, wäre bei der Realisierung einer dauerhaften Sohlschwelle der Bau einer Schleuse nötig, weil die dauerhafte Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist. Deshalb wurde im weiteren Prozess eine flexible Sohlschwelle untersucht, die den Querschnitt am Emssperrwerk nicht dauerhaft, sondern nur zu bestimmten Tidephasen einschränkt. Zu den anderen Tidephasen ist Schiffsverkehr möglich. Im Ergebnis führt nur eine Einengung des Querschnitts im Flutstrom zu einer Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports im Vergleich zur dauerhaften Sohlschwelle. Um die Einschränkungen für die Schifffahrt weiter zu verringern, wurde die flexible Sohlschwelle nicht im gesamten Flutstrom betrieben, sondern nur für 2, 3, 4, 5 oder 6 Stunden. Optimal bezüglich des residuellen Schwebstofftransports ist eine Dauer von 4 Stunden. Neben der Wirkung auf den residuellen Schwebstofftransport und der Gewährleistung des Schiffsverkehrs ist als dritter Punkt auch die technische Realisierbarkeit der Maßnahme zu beachten mit Fragen, wie z.B. nach der Belastung des Bauwerks im Sohlschwellenbetrieb oder nach den Umbaukosten. Die flexible Sohlschwelle ist in diesem Bericht so ausgelegt, dass sie prinzipiell ohne Umbau des Emssperrwerks realisiert werden kann: Die Sohlschwelle wird mittels des vorhandenen Drehsegmentverschlusses nur in der Hauptschiffahrtsöffnung (HSÖ) realisiert. Alle weiteren Sperrwerkstore sind im Sohlschwellenbetrieb geschlossen. Das bedeutet aber, dass sich im Sohlschwellenbetrieb so hohe Strömungsgeschwindigkeiten an der HSÖ und stromab einstellen können, dass die Standsicherheit des Emssperrwerks im Sohlschwellenbetrieb bisher nicht geklärt werden konnte. Diesbezüglich bietet die letzte untersuchte Variante, die komplette Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser einen Vorteil: Ein Umbau des Emssperrwerks ist ebenfalls nicht notwendig, hohe Strömungsgeschwindigkeiten werden in Bauwerksnähe aber vermieden.</p>			
(14) Standort	(15) Archiv-Nr.		

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	2
3	Untersuchungskonzept	2
4	Vergleichszustand und Untersuchungsvarianten	7
4.1	Ist-Zustand als Vergleichszustand	7
4.2	Untersuchungsvarianten	7
5	Wirkung der Untersuchungsvarianten	9
5.1	Dauerhafte Sohlschwelle am Emssperrwerk	9
5.1.1	Wirkung auf die Hydrodynamik	11
5.1.2	Wirkung auf die Salzintrusion	18
5.1.3	Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt	22
5.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	27
5.2	Flexible Sohlschwelle	28
5.2.1	Flexible Sohlschwelle nur im Flutstrom oder nur im Ebbestrom	29
5.2.1.1	Wirkung auf die Hydrodynamik	31
5.2.1.2	Wirkung auf die Salzintrusion	42
5.2.1.3	Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt	46
5.2.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	53
5.2.2	Variation der aktiven Dauer einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom	54
5.2.2.1	Wirkung auf die Hydrodynamik	55
5.2.2.2	Wirkung auf die Salzintrusion	67
5.2.2.3	Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt	71
5.2.2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	78
5.3	Zeitweise geschlossenes Emssperrwerk um Tideniedrigwasser	78
5.3.1	Wirkung auf die Hydrodynamik	79
5.3.2	Wirkung auf den Salzgehalt	86
5.3.3	Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt	88
5.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	91
6	Annahmen und Einschränkungen	92
7	Anpassungs- und Widerstandsfähigkeit gegen Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg	93



8	Vergleich und Ausblick	95
9	Literaturverzeichnis	99
10	Glossar	100
11	Übersicht verwendeter Modellläufe	109

Bildverzeichnis

Seite

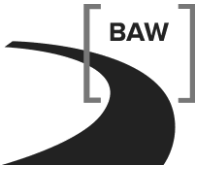
Bild 1:	Das Modellgebiet des Ems-Modells	5
Bild 2:	Häufigkeitsverteilung für 3652 Tagesmittelwerte des Abflusses Versen	6
Bild 3:	Ist-Zustand und dauerhafte Sohlschwelle in einer 3D-Ansicht	9
Bild 4:	Querschnitt des Emssperrwerks Ist-Zustand und dauerhafte Sohlschwelle	10
Bild 5:	Querschnittseinengung der dauerhaften Sohlschwelle	10
Bild 6:	Mittleres Flutstromvolumen für die dauerhafte Sohlschwelle	11
Bild 7:	Mittleres Ebbestromvolumen für die dauerhafte Sohlschwelle	12
Bild 8:	Mittleres Tidehochwasser für die dauerhafte Sohlschwelle	12
Bild 9:	Mittleres Tideniedrigwasser für die dauerhafte Sohlschwelle	13
Bild 10:	Mittlerer Tidehub für die dauerhafte Sohlschwelle	13
Bild 11:	Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung für die dauerhafte Sohlschwelle	14
Bild 12:	Mittlere Laufzeit der Ebbestromkenterung für die dauerhafte Sohlschwelle	14
Bild 13:	Mittlere Flutstromdauer für die dauerhafte Sohlschwelle	15
Bild 14:	Mittlere Ebbestromdauer für die dauerhafte Sohlschwelle	15
Bild 15:	Mittlere Flutstromgeschwindigkeit für die dauerhafte Sohlschwelle	16
Bild 16:	Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit für die dauerhafte Sohlschwelle	16
Bild 17:	Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für die dauerhafte Sohlschwelle	18
Bild 18:	Maximaler Salzgehalt für die dauerhafte Sohlschwelle	19
Bild 19:	Mittleres Tidemittelwasser für die dauerhafte Sohlschwelle	20
Bild 20:	Mittlerer (eulerscher) Flutstromweg für die dauerhafte Sohlschwelle	21
Bild 21:	Mittlerer (eulerscher) Ebbestromweg für die dauerhafte Sohlschwelle	21
Bild 22:	Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromwege für die dauerhafte Sohlschwelle	22
Bild 23:	Max. Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion für die dauerhafte Sohlschwelle	23
Bild 24:	Mittl. Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion für die dauerhafte Sohlschwelle	23
Bild 25:	Maximale Flutstromgeschwindigkeit für die dauerhafte Sohlschwelle	24
Bild 26:	Maximale Ebbestromgeschwindigkeit für die dauerhafte Sohlschwelle	24

Bild 27:	Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für die dauerhafte Sohlschwelle	25
Bild 28:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom für die dauerhafte Sohlschwelle	26
Bild 29:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom für die dauerhafte Sohlschwelle	26
Bild 30:	Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport für die dauerhafte Sohlschwelle	27
Bild 31:	Querschnitt des Emssperrwerks für flexible Sohlschwelle	29
Bild 32:	Querschnittseinengung der flexiblen Sohlschwelle	30
Bild 33:	Skizze des zeitlichen Verlaufs der Querschnittseinengung für die flexible Sohlschwelle im Ebb- und Flutstrom	31
Bild 34:	Mittleres Flutstromvolumen für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	32
Bild 35:	Mittleres Tidehochwasser für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	32
Bild 36:	Mittleres Ebbstromvolumen für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	33
Bild 37:	Mittleres Tideniedrigwasser für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	34
Bild 38:	Mittlerer Tidehub für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	35
Bild 39:	Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	36
Bild 40:	Mittlere Laufzeit der Ebbestromkenterung für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	37
Bild 41:	Mittlere Flutstromdauer für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	37
Bild 42:	Mittlere Ebbestromdauer für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	38
Bild 43:	Mittlere Flutstromgeschw. für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	39
Bild 44:	Mittlere Ebbestromgeschw. für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	39
Bild 45:	Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	40
Bild 46:	Max. Strömungsgeschw. und die Dauer hoher Strömungsgeschwindigkeiten größer als 2 m/s für flex. Sohlschwelle im Flutstrom und Ebbstrom	41
Bild 47:	Maximaler Salzgehalt für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	42
Bild 48:	Mittleres Tidemittelwasser für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	43
Bild 49:	Mittlerer Flutstromweg für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	44
Bild 50:	Mittlerer Ebbestromweg für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	45

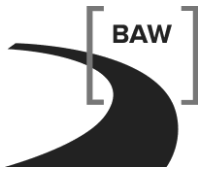
Bild 51:	Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromwege für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	46
Bild 52:	Maximaler Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	47
Bild 53:	Mittlerer Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	48
Bild 54:	Max. Flutstromgeschw. für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	49
Bild 55:	Max. Ebbestromgeschw. für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	49
Bild 56:	Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	50
Bild 57:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	51
Bild 58:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	51
Bild 59:	Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport für die flex. Sohlschwelle im Flut- und Ebbstrom	53
Bild 60:	Skizze des zeitlichen Verlaufs der Querschnittseinengung für verschiedene Dauer-Varianten einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom	55
Bild 61:	Mittleres Flutstromvolumen für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	57
Bild 62:	Mittleres Ebbestromvolumen für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	57
Bild 63:	Mittleres Tidehochwasser für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	58
Bild 64:	Mittleres Tidehochwasser für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	58
Bild 65:	Mittlerer Tidehub für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	59
Bild 66:	Wasserstand im Unterwasser des Emssperrwerks für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	59
Bild 67:	Wasserstand im Oberwasser des Emssperrwerks für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	60
Bild 68:	Vergleich des Wasserstandes und der Steigung des Wasserstandes	61
Bild 69:	Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	62
Bild 70:	Mittlere Laufzeit der Ebbestromkenterung für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	62
Bild 71:	Mittlere Flutstromdauer für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	63

Bild 72:	Mittlere Ebbestromdauer für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	63
Bild 73:	Mittl. Flutstromgeschwindigkeit für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	64
Bild 74:	Mittl. Ebbestromgeschwindigkeit für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	65
Bild 75:	Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	65
Bild 76:	Max. Strömungsgeschw. und die Dauer hoher Strömungsgeschwindigkeiten größer als 2 m/s für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	66
Bild 77:	Maximaler Salzgehalt für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	68
Bild 78:	Mittleres Tidemittelwasser für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	68
Bild 79:	Mittlerer Flutstromweg für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	69
Bild 80:	Mittlerer Ebbestromweg für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	69
Bild 81:	Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromweg für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	70
Bild 82:	Strömungsgeschw. bei Weener für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	70
Bild 83:	Salzgehalt bei Weener für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	71
Bild 84:	Mittlerer Schwebstoffgehalt für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	72
Bild 85:	Maximaler Schwebstoffgehalt für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	72
Bild 86:	Momentaufnahmen des Schwebstoffgehalts für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	73
Bild 87:	Max. Flutstromgeschwindigkeit für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	74
Bild 88:	Max. Ebbestromgeschwindigkeit für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	75
Bild 89:	Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	75
Bild 90:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	76
Bild 91:	Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	77
Bild 92:	Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport für Dauer-Varianten der flex. Sohlschwelle	77
Bild 93:	Skizze des zeitlichen Verlaufs der Steuerung der Tore des Emssperrwerks für die untersuchte Vollsperrung bei einem Wasserstand < NHN-1m	79
Bild 94:	Wasserstandszeitreihe bei Ems-km 30 für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	80

Bild 95:	Mittl. Tidehochwasser für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	80
Bild 96:	Mittl. Tideniedrigwasser für zeitw. kompl. Schließung des Emssperrwerks	81
Bild 97:	Mittlerer Tidehub für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	81
Bild 98:	Strömungsrichtung bei Ems-km 30 für zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks	82
Bild 99:	Strömungsgeschwindigkeit bei Knock für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	83
Bild 100:	Strömungsgeschwindigkeit bei Ems-km 40 für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	84
Bild 101:	Strömungsgeschwindigkeit bei Ems-km 30 für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	85
Bild 102:	Strömungsgeschwindigkeit bei Ems-km 15 für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	86
Bild 103:	Maximaler Salzgehalt für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	87
Bild 104:	Mittleres Tidemittelwasser für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	87
Bild 105:	Max. Schwebstoffgehalt für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	89
Bild 106:	Mittl. Schwebstoffgehalt für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	89
Bild 107:	Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	90
Bild 108:	Schwebstoffgehalt für zeitw. komplette Schließung des Emssperrwerks	91
Bild 109:	Sturmflutscheitelwasserstand für das Sturmflutszenario SF06	94
Bild 110:	Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport; Variantenvergleich	96
Bild 111:	Maximum, Mittelwert u. Minimum des Analysezeitraums	102
Bild 112:	Tidekennwerte des Wasserstandes	103
Bild 113:	Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit	104
Bild 114:	Tidekennwerte des Salzgehaltes	106
Bild 115:	Lage der definierten Querprofile in der Außenems und Unterems	108



Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Drempeltiefen am Emssperrwerk	7
Tabelle 2: Übersicht zu den Untersuchungsvarianten	8
Tabelle 3: Ankunftszeit der originären Schwallwelle und der reflektierten Schwallwelle	60
Tabelle 4: Verwendete Modellläufe für die dauerhafte Sohlschwelle	109
Tabelle 5: Verwendete Modellläufe für die flexible Sohlschwelle im Flut- oder Ebbstrom	109
Tabelle 6: Verwendete Modellläufe für die Variation der Dauer einer flex. Sohlschwelle	109
Tabelle 7: Verwendete Modellläufe für das zeitweise geschlossene Emssperrwerk	109



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Bundesverkehrsministerium initiierte 2008 das Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung der Verschlickung der Unterems (APE). In diesem Rahmen wurden WSV-intern (BAW-DH, WSA Emden, WSD NW) mehrere Maßnahmen entwickelt, wobei sich neben Retentionsbecken, Schlickfalle und der Optimierung des Geiseleitdamms der Bau einer Sohlschwelle im Nahbereich des Sperrwerks als eine besonders wirksame Lösung herausgestellt hat.

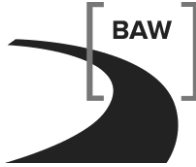
Mit der Unterzeichnung des Masterplans Ems 2050 im Frühjahr 2015 wurde das Ziel der „nachhaltigen Entwicklung und Optimierung des Ems-Ästuars im Hinblick auf die Natürlichkeit, Sicherheit und Zugänglichkeit“ festgeschrieben. Unter gemeinsamer Betrachtung ökologischer und ökonomischer Interessen ist die Lösung des Schlickproblems in der Unterems vorrangiges Ziel. Es soll damit die langfristige Verbesserung des ökologischen Zustands unter Sicherung der wirtschaftlichen Entwicklung der Region und der Erhalt der Ems als leistungsfähige Bundeswasserstraße sowie die Zugänglichkeit der Häfen erreicht werden.

In Artikel 10 des Masterplans Ems 2050 werden drei wasserbauliche Maßnahmen zur Lösung des Schlickproblems beschrieben, für die Machbarkeitsstudien zu erarbeiten sind. „Auf Grundlage der Ergebnisse und unter Verwendung eines übergreifenden Ziel- und Bewertungssystems wird entschieden, welcher der drei Lösungsansätze oder auch eine Kombination von ihnen gemeinsam mit dem Ziel der Umsetzung weiter verfolgt werden soll.“

Die Lösungsansätze der Tidespeicherbecken und der Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk werden in Landesverantwortung vom NLWKN bearbeitet, der Sohlschwellenansatz wird von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes weiter verfolgt.

Ein Baustein der Machbarkeitsuntersuchung (MBU) für die Sohlschwelle sind die Untersuchungen der BAW zur hydromorphologischen Wirksamkeit der Maßnahme. Dazu wurden sowohl eine dauerhafte¹, feste Sohlschwelle als auch verschiedene Steuerungsszenarien flexibler Sohlschwellenelemente unter weitgehender Nutzung der vorhandenen Verschlussorgane des Emssperrwerks mit dem Ziel der Minderung des residuellen Schwebstoffeintrags in die Ems numerisch untersucht und die Wirkung auf Hydrodynamik, Salzintrusion und den Schwebstoff-Haushalt analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in diesem Ergebnisbericht festgehalten.

¹ Mit „dauerhaft“ ist gemeint, dass die Sohlschwelle immer, also zu jeder Zeit aktiv ist. Bautechnisch ist dies z.B. durch Steinschüttungen zu erzielen.



2 Unterlagen und Daten

Das für diese Untersuchungen verwendete HN-Modell der Ems wird im BAW-Gutachten zur Außenemsvertiefung beschrieben (BAW, 2012). Für die hier durchgeführten Untersuchungen sind 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.

Teile dieses Ergebnisberichts sind in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig erfolgt:

- Die Masterarbeit von Inga Dirks (Dirks, 2015) mit dem Thema „Numerische Simulation einer Wehrsteuerung des Emssperrwerks zur Verminderung des stromaufgerichteten residuellen Schwebstofftransports in der Unterems“ und

Diese Arbeit wird in diesem Ergebnisbericht in zusammengefasster Form berücksichtigt.

Die Wirkung einer dauerhaften Sohlschwelle (siehe auch Kapitel 5.1) ist 2010 im Rahmen des Aktionsprogramms des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems in einem Bericht zur vertieften Wirkanalyse (BAW, 2010) und 2015 im Rahmen des BAW-Forschungs- und Entwicklungsprojekts „Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems“ (BAW, 2015) untersucht worden. Der Begriff „dauerhafte Sohlschwelle“ entspricht dem Begriff „fester Sohlschwelle“, welcher im FuE-Bericht „Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems“ (BAW, 2015) verwendet wird. Hier wird der Begriff „dauerhaft“ verwendet, um diese Variante von den nicht dauerhaften, sondern nur zu bestimmten Tidephasen aktiven, also flexiblen Sohlschwellen abzugrenzen.

3 Untersuchungskonzept

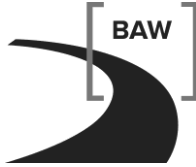
Primäres Ziel dieser Untersuchung ist es, Aussagen darüber zu treffen, inwieweit eine dauerhafte oder eine flexible Sohlschwelle am Emssperrwerk die hohen Schwebstoffkonzentrationen in der Unterems und den Schwebstoffeintrag in die Unterems reduzieren, bzw. verhindern kann. Deshalb wird mittels des hydrodynamisch-numerischen Modells UnTRIM (Casulli und Walters, 2000; Casulli und Zanolli, 2002) in Kopplung mit dem morphodynamisch-numerischen Modell SediMorph (BAW, 2005) ein Modell der Ems verwendet, wie es auch für die Bestimmung der ausbaubedingten Änderungen für die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden verwendet wurde (BAW, 2012). 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 zu können. Die Bestimmung der Tidekennwerte ist notwendig, um die Wirkzusammenhänge aufzeigen zu können. Es ist in weitergehenden Untersuchungen noch zu klären, ob dieser Zeitraum von 4 Wochen ausreichend ist, um die Veränderungen der baroklinen Zirkulation abschließend beurteilen zu können. Das bedeutet, dass die vorliegenden Darstellungen und Aussagen zur Änderung der Salzintrusion ggf. nur die kurzfristigen Änderungen durch veränderte Strömungsgeschwindigkeiten und –dauern vollständig berücksichtigen.

Wichtige Tidekennwerte dieser Untersuchung sind das Flut- und Ebbestromvolumen, die Flut- und Ebbestromdauer, die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, der mittlere und maximale Schwebstoffgehalt während einer Tide, der advective Schwebstofftransport mit dem Flut- und dem Ebbestrom und letztlich der residuelle Schwebstofftransport (die Differenz des Schwebstofftransports mit dem Flutstrom minus Ebbestrom). Alle genannten Kennwerte werden querschnittsgemittelt oder für Transport-Größen querschnittsintegriert im Längsschnitt dargestellt, sind also repräsentativ als Mittelwert, bzw. als Integralwert für den gesamten Querschnitt. Der letztgenannte Tidekennwert beschreibt, ob im Modell der Ems der Schwebstoffeintrag mit dem Flutstrom für den betrachteten Querschnitt größer ist als der Austrag mit dem Ebbestrom oder ob der Austrag mit dem Ebbestrom größer ist.

Die Modellergebnisse des Schwebstoffgehalts sowie auch die daraus resultierenden Tidekennwerte sind vergleichsweise weniger belastbar als die Tidekennwerte der Hydrodynamik, weil z.B. das Modell der Ems keine Fluid-Mud-Modellierung enthält. Deshalb werden in diesem Bericht die Änderungen des Schwebstoffgehalts und des –Transports mit den Änderungen der Tidekennwerte der Hydrodynamik in Beziehung gesetzt, um somit zu einer größeren Belastbarkeit bezüglich der Änderungen des Schwebstoffhaushalts in der Unterems zu kommen.

Neben dem primären Ziel der Reduzierung des Schwebstoffeintrags in die Unterems sind auch die Aufrechterhaltung des Schiffsverkehrs und die technische Umsetzung zu berücksichtigen. Die dauerhafte Sohlschwelle, die erstmals 2010 im Rahmen des Aktionsprogramms des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems in einem Bericht zur vertieften Wirkanalyse untersucht wurde (BAW, 2010), hat den Nachteil, dass sie z.B. für die Belange der Schifffahrt den Bau einer Schleuse am Emssperrwerk zwingend erforderlich macht, weil die dauerhafte Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht auch die Wirkung einer flexiblen Sohlschwelle untersucht, denn eine flexible Sohlschwelle wird nur



zu bestimmten Tidephasen aktiviert. Schifffahrt durch das Emssperrwerk ist in den Tidephasen möglich, in denen die flexible Sohlschwelle nicht aktiviert ist. Flexible Sohlschwellen bieten also das Potential, auf den Bau einer Schleuse am Emssperrwerk zu verzichten. Desweiteren wird die ökologische Durchgängigkeit weniger beeinträchtigt. Ebenso wird in diesem Bericht auch die Untersuchungsvariante eines zeitweise geschlossenen Emssperrwerks um Tideniedrigwasser untersucht. Der Vorteil dieser Variante ist, dass sie ggf. ohne großen Um- oder Neubau realisiert werden könnte und dass sicher prognostiziert werden kann, dass während des geschlossenen Emssperrwerks die Strömungsgeschwindigkeiten in der Nähe des Sperrwerks nicht unzulässig hoch sein können. Die Standsicherheit wäre nicht gefährdet.

Die Untersuchung und Analyse einer Untersuchungsvariante erfolgt vom kalibrierten Ist-Zustand ausgehend in drei Schritten:

- Simulation der Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstoffgehalts für eine Untersuchungsvariante. Dazu muss vorweg für diese Untersuchungsvariante die zeitliche Abfolge der Höhe der Torstellungen des Emssperrwerks in Form von Randwertzeitreihen für den gesamten Simulationszeitraum vom Modellierer festgelegt werden.
- Analyse und Darstellung wesentlicher Tidekennwerte für die Untersuchungsvariante für einen Spring-Nipp-Zeitraum (hier für den Zeitraum 6.5.2010 08:00 Uhr bis 21.5.2010 03:00 Uhr). Die dargestellten Tidekennwerte sind Mittelwerte über alle 28 Tiden des gewählten Zeitraums.
- Ableitung der hydrodynamischen Wirkung einer Untersuchungsvariante durch Vergleich der Zeitreihen und Kennwerte verschiedener Varianten und des Ist-Zustands.

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).

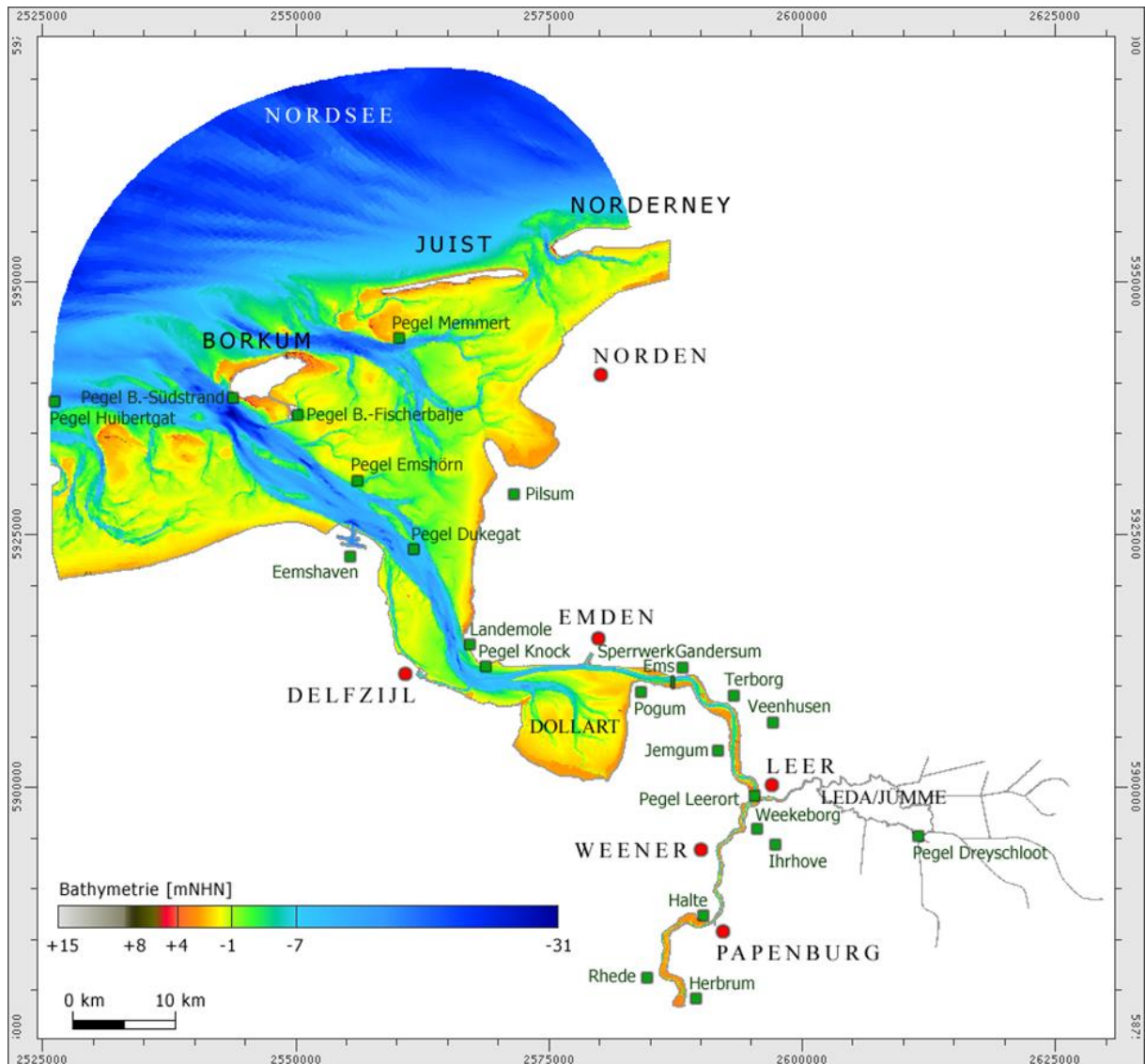


Bild 1: Das Modellgebiet des Ems-Modells von seewärts der ostfriesischen Inseln Borkum, Juist und Norderney bis zum Wehr Herbrum.

Der Seerand ist somit etwa 75 km seewärts des Emssperrwerks. Die Nebenflüsse Leda und Jümme, sowie die Ersatzsysteme der an die Nebenflüsse angeschlossenen Tiefs (z.B. Sager 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.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Bestimmung der Tidekennwerte der Strömung ist, dass jede Tide genau zwei Strömungskenterungen hat, eine nach dem Flutstrom und eine zweite

nach dem Ebbestrom. Zwischen Papenburg und Herbrum ist diese Voraussetzung nicht immer erfüllt:

1. Bei hohem Oberwasserzufluss findet ggf. kein Flutstrom mehr statt, die Anzahl der Kenterungen während einer Tide ist dann Null.
2. Der Flutstrom kann um Tidehochwasser mehrfach kentern. Die Anzahl der Kenterungen während einer Tide ist dann größer als zwei.

In dieser Untersuchung ist der zweite Fall aufgetreten. Das bedeutet, dass auch die Dauer des Flut- und Ebbestroms nicht korrekt ermittelt wird. Deshalb werden die Tidekennwerte der Strömung, des Salzgehalts und des Schwebstoffgehalts und -transports nur bis Papenburg dargestellt. Dies ist zur Beurteilung der Wirkung der verschiedenen Varianten auf den Schwebstofftransport in der Unterems nicht schädlich, da der Sedimenteintrag in die Unterems im Ist-Zustand von seewärts getrieben wird.

Eine Erläuterung der Tidekennwerte und von Fachvokabular ist im Glossar in Kapitel 10 zu finden.

Der Oberwasserzufluss der Ems wird für alle 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 2).

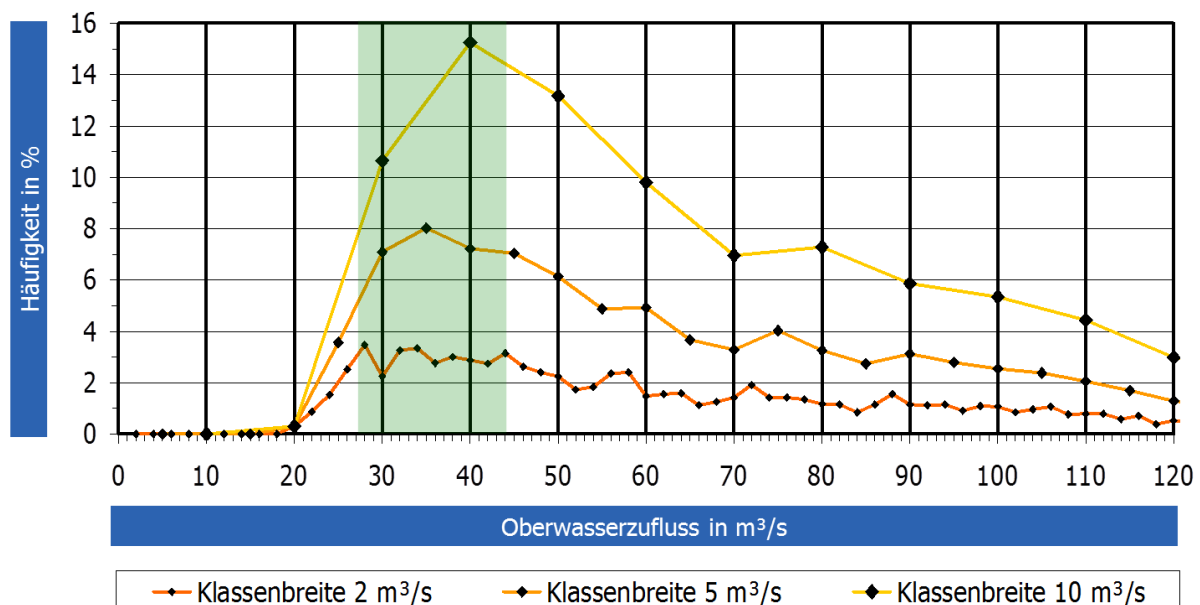


Bild 2: Häufigkeitsverteilung für 3652 Tagesmittelwerte des Abflusses Versen (Gesamt) für den Zeitraum 1. November 2001 bis 31. Oktober 2011 und für drei verschiedene Klassenbreiten. Grün hinterlegt der Wertebereich des Oberwasserzuflusses mit den höchsten Häufigkeiten.

4 Vergleichszustand und Untersuchungsvarianten

4.1 Ist-Zustand als Vergleichszustand

Das für diese Untersuchungen verwendete HN-Modell der Ems wird im BAW-Gutachten zur Außenemsvvertiefung beschrieben (siehe bezüglich der Abmessungen des HN-Modells Kapitel 5.2 in BAW, 2012 und bezüglich der Kalibrierung und Validierung Kapitel 5.4, ebenfalls in BAW, 2012). Die Bathymetrie des Gitternetzes basiert auf dem digitalen Geländemodell 2010 der Ems, das von den Firmen inphoris und smile in Zusammenarbeit mit der BfG und dem WSA Emden erstellt worden ist (ARGE Unter-/Außenems, 2012).

Für den hier verwendeten Ist-Zustand wurden darüber hinaus folgende Anpassungen vorgenommen:

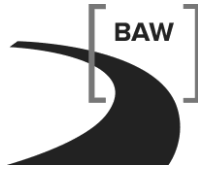
- Die Fahrrinne der Unter- und Außenems wurde auf die planfestgestellte Tiefe vertieft, sofern sie im digitalen Geländemodell 2010 der Ems flacher war.
- Die Drempeltiefen am Emssperrwerk wurden auf Solltiefen gesetzt:

NÖ1	HSÖ	BSÖ	NÖ2	NÖ3 – NÖ5
NHN-7m	NHN-9m	NHN-7m	NHN-7m	NHN-5m

Tabelle 1: Drempeltiefen am Emssperrwerk

4.2 Untersuchungsvarianten

In diesem Ergebnisbericht werden verschiedene Varianten einer Querschnittseinengung am Emssperrwerk untersucht. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Szenarien wieder, eine detaillierte Beschreibung erfolgt im jeweiligen Abschnitt von Kapitel 5.



Varianten	Aktivierungszeiträume	Torstellung im aktiven Betrieb
Dauerhafte Sohlschwelle	Die Sohlschwelle engt den Querschnitt dauerhaft ein.	Alle Tore als Sohlschwelle mit Höhe von -1,50m NHN
Flexible Sohlschwelle im Ebbestrom	Der Querschnitt wird im Ebbestrom eingengt. Das Schließen- und Öffnen der Tore dauert jeweils 20 min.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle im Flutstrom	Der Querschnitt wird im Flutstrom eingengt. Das Schließen- und Öffnen der Tore dauert jeweils 20 min.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle für 2h im Flutstrom	Das Schließen der Tore beginnt mit der Ebbestromkenterung und dauert 20 min. Nach 2h Beginn der Öffnung der Tore. Dauer der Öffnung: 1 Stunde.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle für 3h im Flutstrom	Das Schließen der Tore beginnt mit der Ebbestromkenterung und dauert 20 min. Nach 3h Beginn der Öffnung der Tore. Dauer der Öffnung: 1 Stunde.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle für 4h im Flutstrom	Das Schließen der Tore beginnt mit der Ebbestromkenterung und dauert 20 min. Nach 4h Beginn der Öffnung der Tore. Dauer der Öffnung: 1 Stunde.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle für 5h im Flutstrom	Das Schließen der Tore beginnt mit der Ebbestromkenterung und dauert 20 min. Nach 5h Beginn der Öffnung der Tore. Dauer der Öffnung: 1 Stunde.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Flexible Sohlschwelle für 6h im Flutstrom	Das Schließen der Tore beginnt mit der Ebbestromkenterung und dauert 20 min. Nach 6h Beginn der Öffnung der Tore. Dauer der Öffnung: 1 Stunde.	Sohlschwelle in HSÖ mit einer Höhe von -4m NHN. BSÖ und alle NÖ geschlossen
Zeitweise geschlossenes Emssperrwerk	Die Tore werden bei einem Wasserstand von -1m NHN im Ebbestrom geschlossen und bei Wasserstandsgleichheit im Ober- und Unterwasser geöffnet	Emssperrwerk komplett geschlossen

Tabelle 2: Übersicht zu den Untersuchungsvarianten

5 Wirkung der Untersuchungsvarianten

5.1 Dauerhafte Sohlschwelle am Emssperrwerk

Die BAW hat erstmals 2010 im Rahmen des Aktionsprogramms des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems in einem Bericht zur vertieften Wirkanalyse die hydrodynamische Wirkung einer dauerhaften Sohlschwelle am Emssperrwerk untersucht (BAW, 2010). Die dauerhafte Sohlschwelle basiert auf dem Ist-Zustand. Einzige Änderung: der Einbau der Sohlschwelle auf Höhe des Emssperrwerks mit einer Oberkante von $\text{NHN}-1,50\text{m}$ (siehe Bild 3, Bild 4 und Bild 5). Die dauerhafte Sohlschwelle wird somit im Modell durch ein festes Bauwerk über den gesamten Querschnitt der Ems repräsentiert.

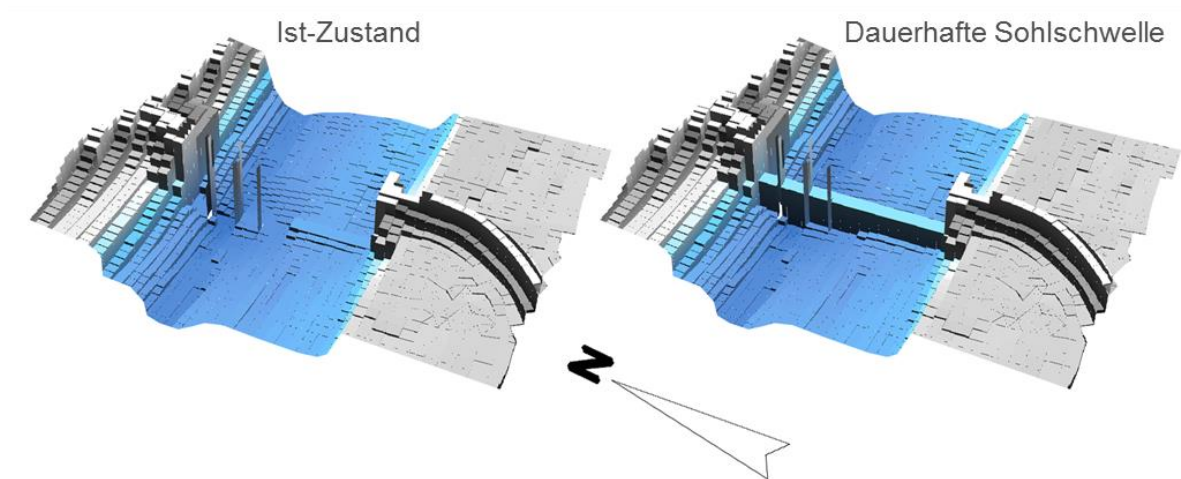


Bild 3: Ist-Zustand (links) und dauerhafte Sohlschwelle (rechts) in einer 3D-Ansicht mit Blick nach Nord-Ost.

Die hier im Folgenden dargestellten Grafiken stammen nicht aus dem oben genannten Bericht der BAW (2010), weil das im Bericht verwendete HN-Modell der Ems noch auf dem Zustand 2005 basierte. Die Grafiken enthalten die Werte des in Kapitel 4.1 erläuterten Ist-Zustands in Schwarz und der dauerhaften Sohlschwelle in Rot.

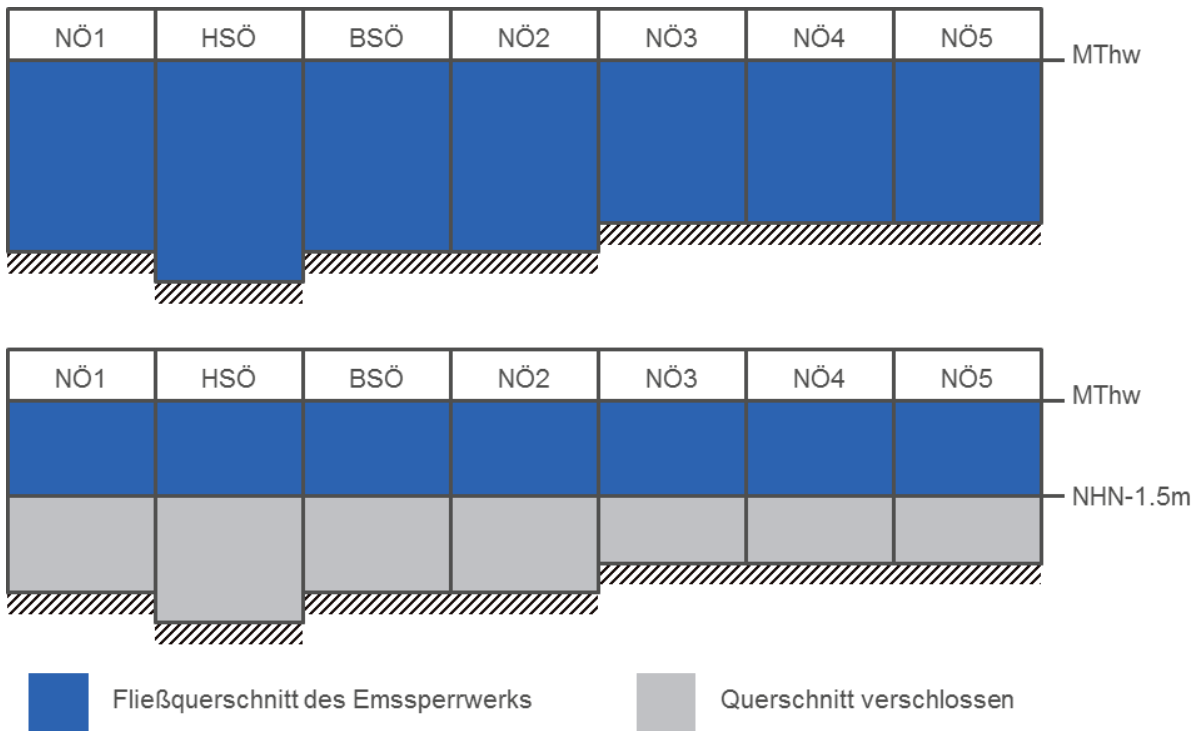


Bild 4: Querschnitt des Emssperrwerks im Ist-Zustand (oben) und mit dauerhafter Sohlschwelle (unten).

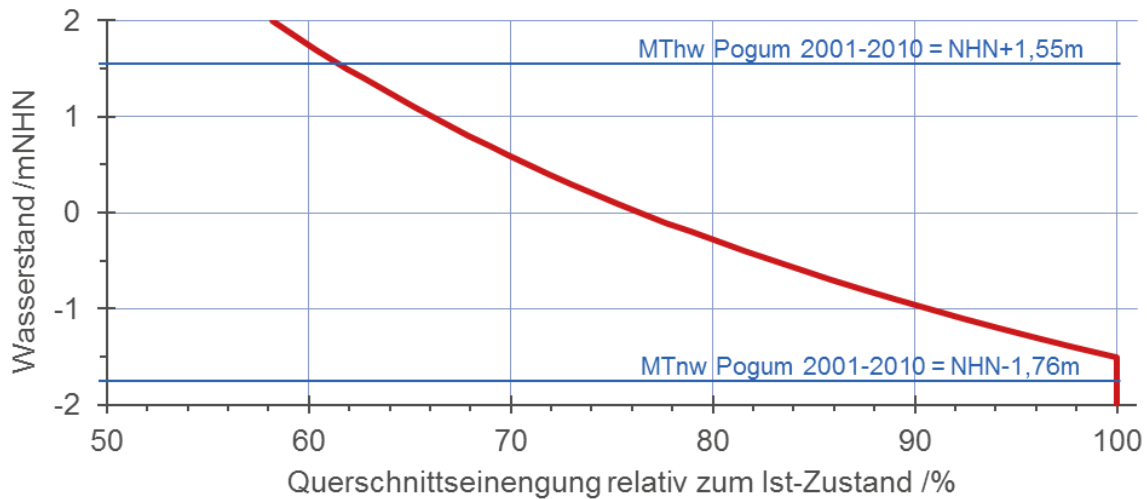


Bild 5: Querschnittseinengung der dauerhaften Sohlschwelle mit einer Schwellen-Oberkante von NHN-1,5m in Abhängigkeit vom Wasserstand und relativ zum Ist-Zustand.

5.1.1 Wirkung auf die Hydrodynamik

Durch die dauerhafte Sohlschwelle wird die Tidedynamik stromauf vom Emssperrewerk deutlich gedämpft, weil der Querschnitt am Emssperrewerk bedingt durch die Einengung weniger leistungsfähig ist. Deshalb nehmen das Flut- und Ebbstromvolumen ab (Bild 6 und Bild 7). Das Tidehochwasser nimmt stromauf vom Emssperrewerk etwa um 1 dm ab (Bild 8) und das Tideniedrigwasser wird um etwa 1,2 m angehoben (Bild 9). Seewärts des Emssperrewerks sinkt das Tideniedrigwasser ab, weil weniger Wasservolumen aus der Unterems zur Stützung des Tideniedrigwassers nachströmt als im Ist-Zustand. Der Tidehub nimmt stromauf vom Emssperrewerk etwa um 1,4 m ab, stromab vom Emssperrewerk führt die Absenkung des Tideniedrigwassers zu einer Zunahme des Tidehubs (Bild 10).

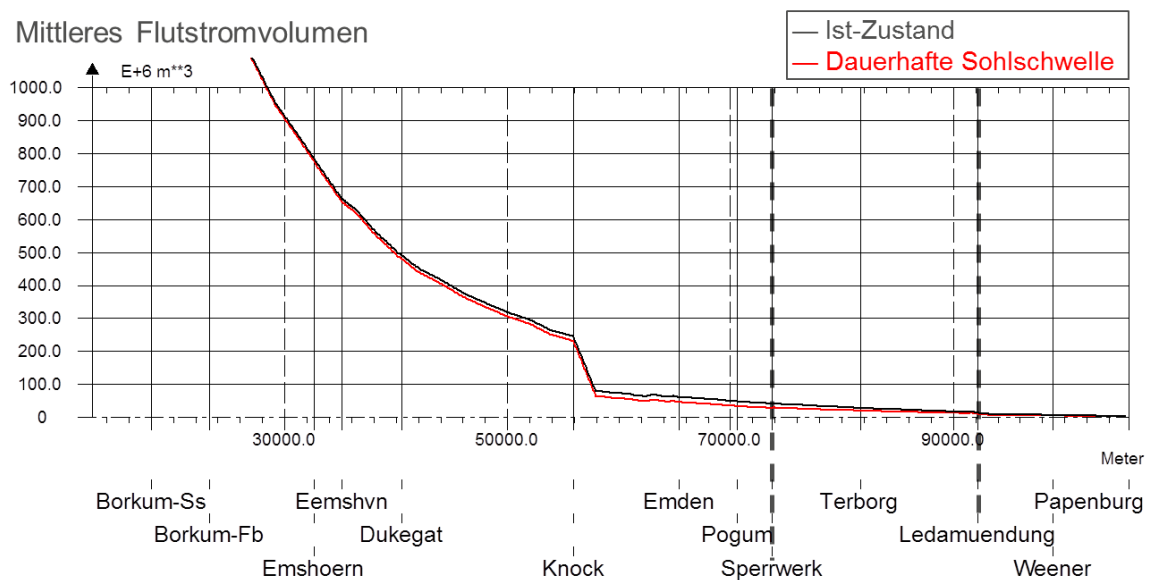


Bild 6: Mittleres Flutstromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Integration).

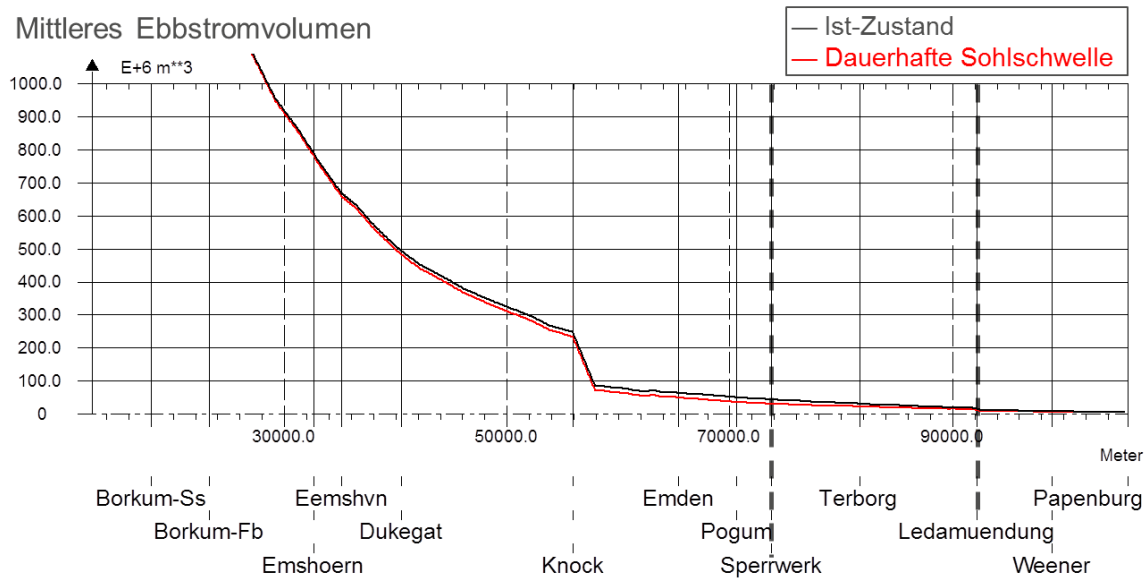


Bild 7: Mittleres Ebbstromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Integration).

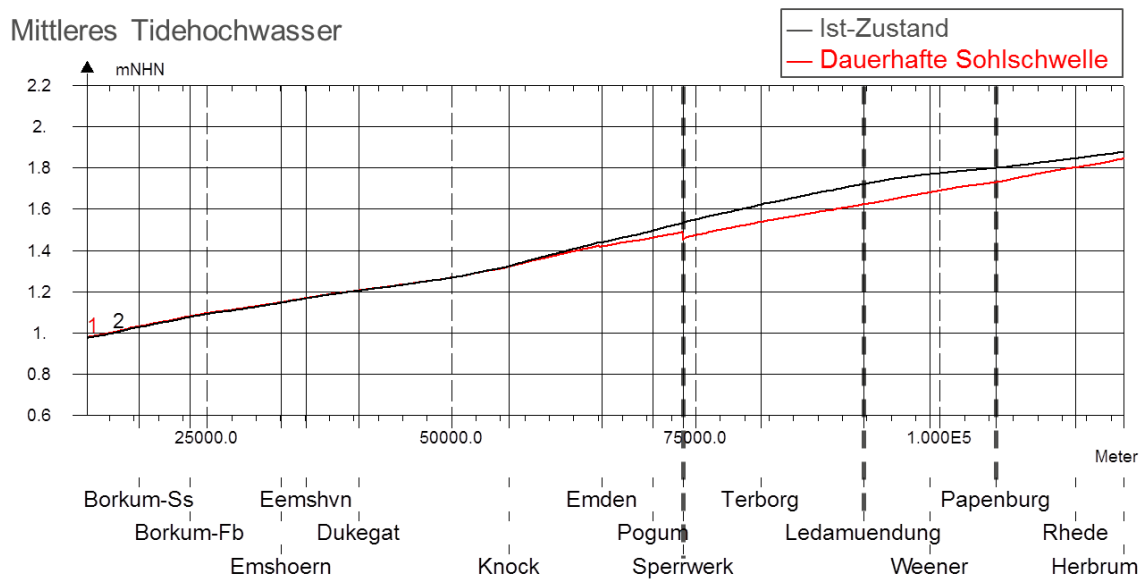


Bild 8: Mittleres Tidehochwasser in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

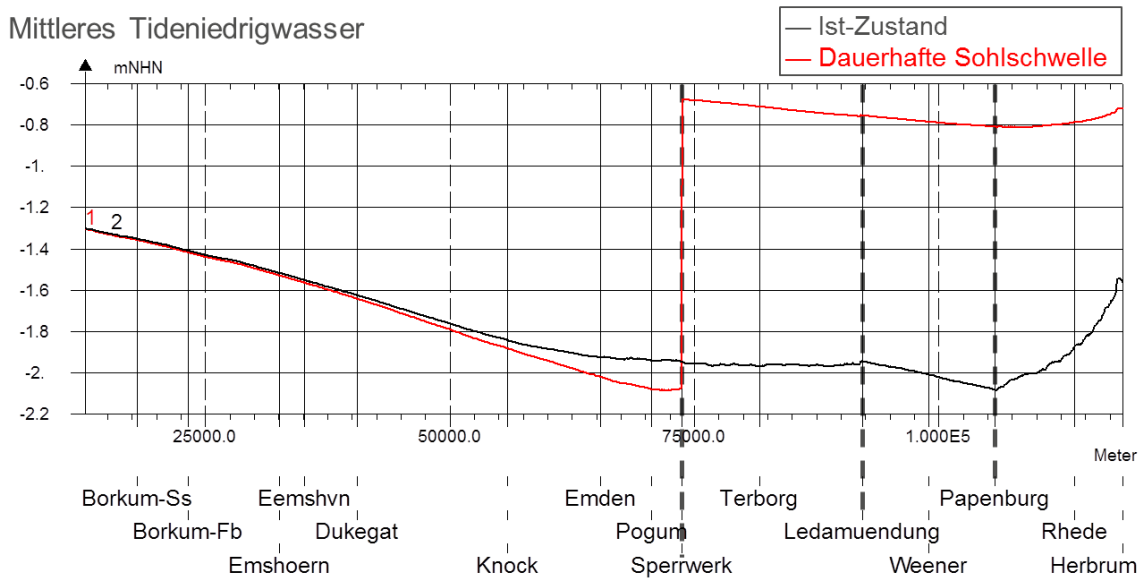


Bild 9: Mittleres Tideniedrigwasser in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

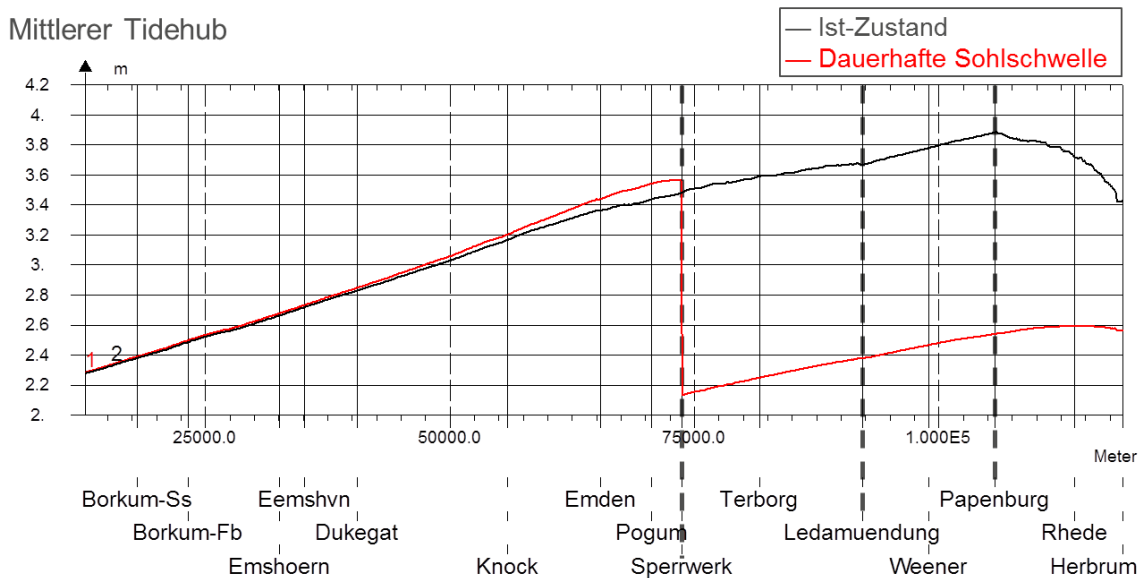


Bild 10: Mittlerer Tidehub in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

Die Flutstrom- und Ebbestromkenterpunkte verspäten sich im Vergleich zum Ist-Zustand, um über eine verlängerte Dauer des jeweiligen Volumenstroms die reduzierte Leistungsfähigkeit zu kompensieren. Für den Ebbstrom gilt dies nur für die Unterems bis zum Emssperrwerk. Der Flutstromkenterpunkt verspätet sich in der Unterems um etwa eine halbe bis 1,5 Stunden. Der Ebbestromkenterpunkt verspätet sich in der Unterems stromauf vom Emssperrwerk etwa konstant um eine halbe Stunde (Bild 11 und Bild 12).

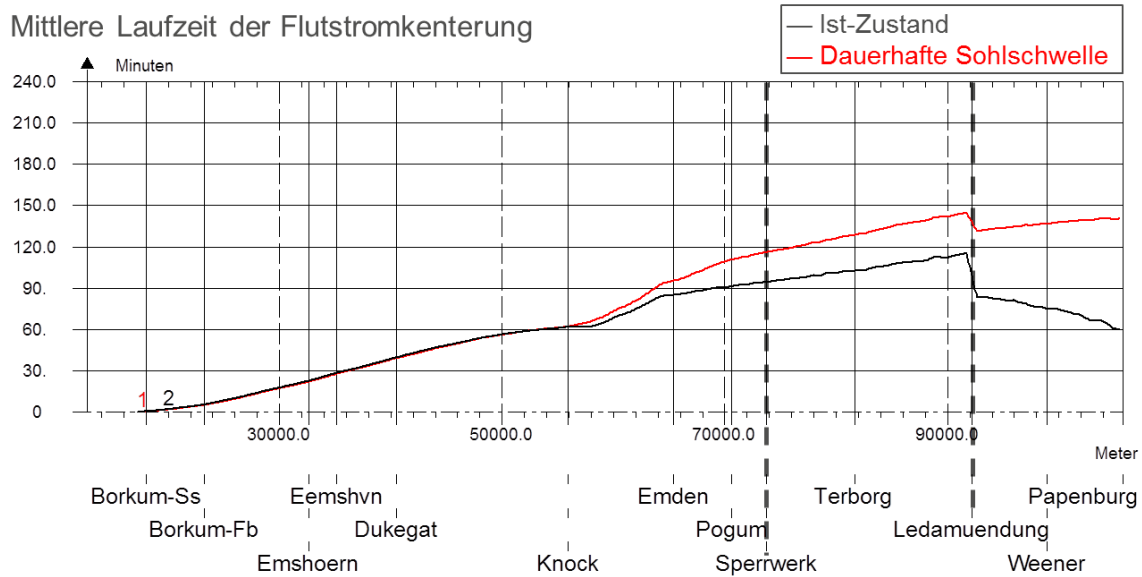


Bild 11: Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

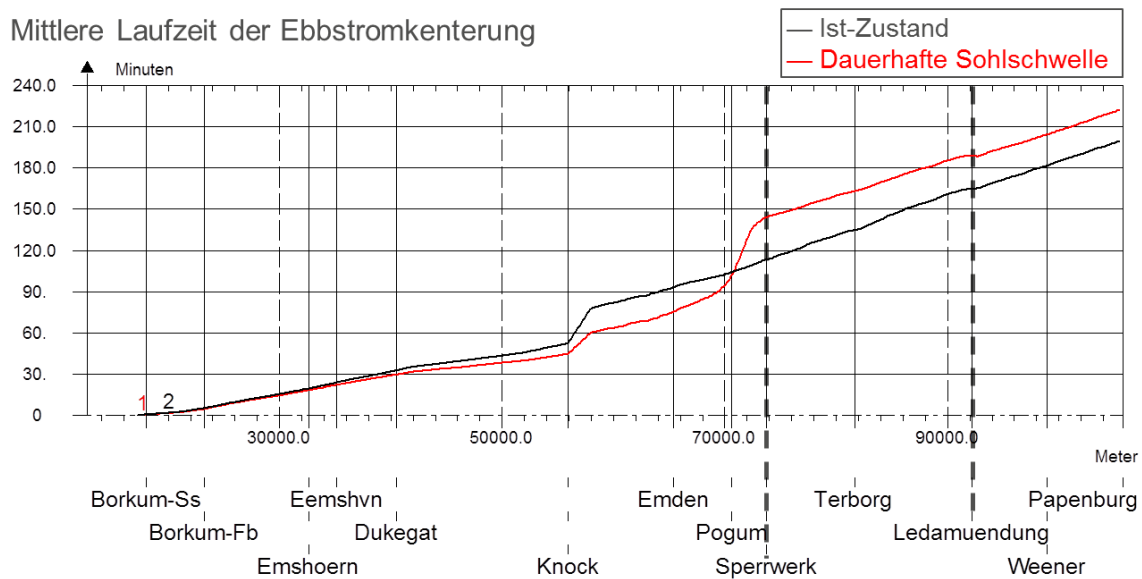


Bild 12: Mittlere Laufzeit der Ebbstromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

Im Abschnitt zwischen Ledamündung und Emssperrwerk verspäten sich sowohl der Ebbe als auch der Flutstromkenterpunkt mit der dauerhaften Sohlschwelle etwa um eine halbe Stunde. Deshalb ist in diesem Bereich die Flut- und Ebbstromdauer in etwa unverändert zum Ist-Zustand. Seewärts vom Emssperrwerk bis etwa in den Gatjebogen und stromauf von der Ledamündung führen die unterschiedlichen Verspätungen der Kenterungen des Flut- und

Ebbstroms dazu, dass sich die Flutstromdauer verlängert und die Ebbestromdauer verkürzt (Bild 13 und Bild 14). Im Emden Fahrwasser beträgt die Zunahme der Flutstromdauer etwa eine halbe Stunde, bei Papenburg nahezu eine Stunde.

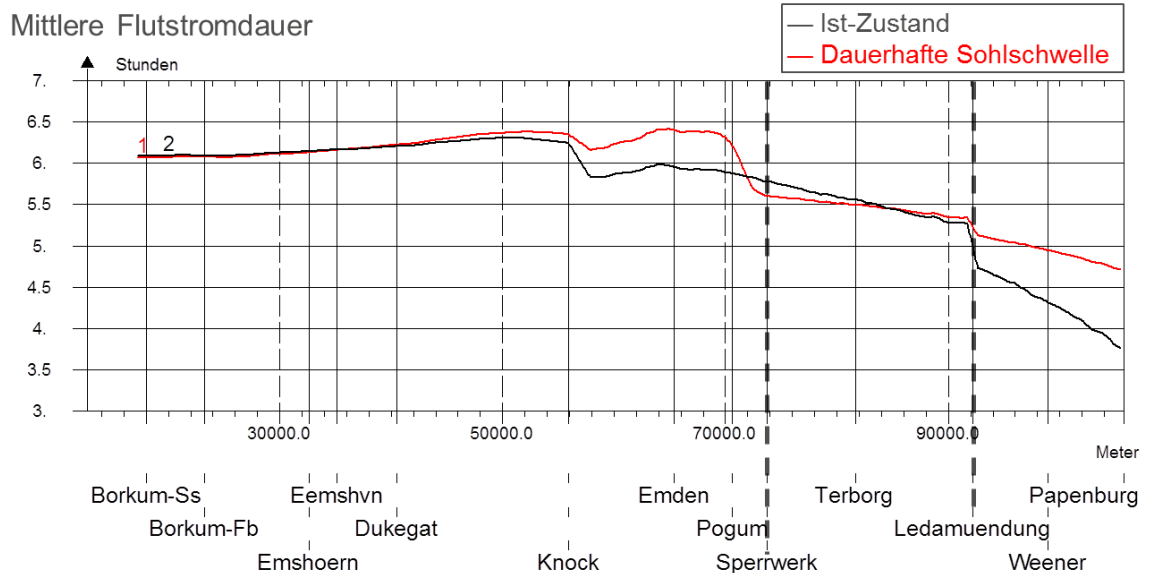


Bild 13: Mittlere Flutstromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

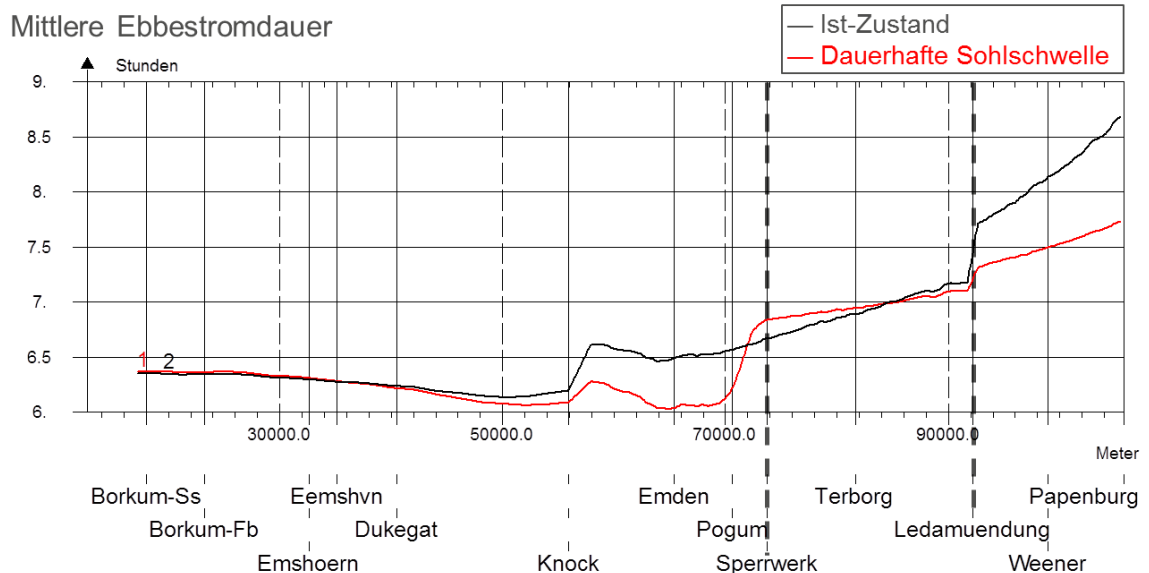


Bild 14: Mittlere Ebbestromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

Die Abnahme des Flut- und Ebbestromvolumens führt unter der Voraussetzung, dass sich die Dauer des Flut- oder Ebbestroms nicht ändert, zwingend zu einer Abnahme der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten. Diese Voraussetzung ist näherungsweise für den

Abschnitt Emssperrwerk bis Ledamündung erfüllt. Seewwärts des Emssperrwerks und stromauf der Ledamündung nimmt die Flutstromdauer zu, deshalb müssen in diesen Abschnitten die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten in zusätzlichem Maße kleiner werden, wohingegen in diesen Abschnitten die Ebbestromdauer abnimmt und deshalb die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten weniger kräftig abnehmen (Bild 15 und Bild 16).

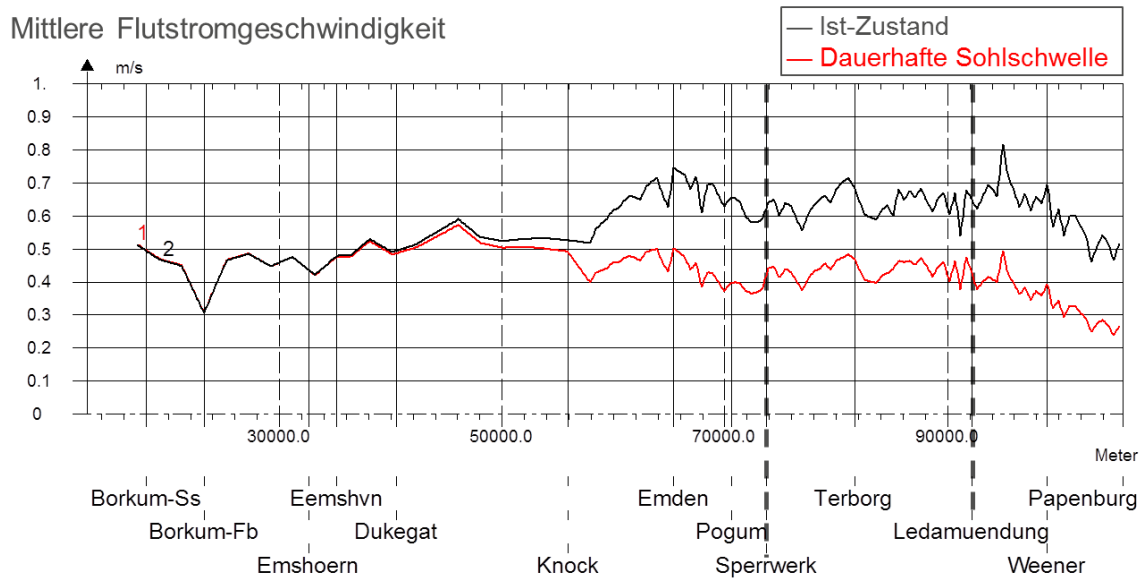


Bild 15: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

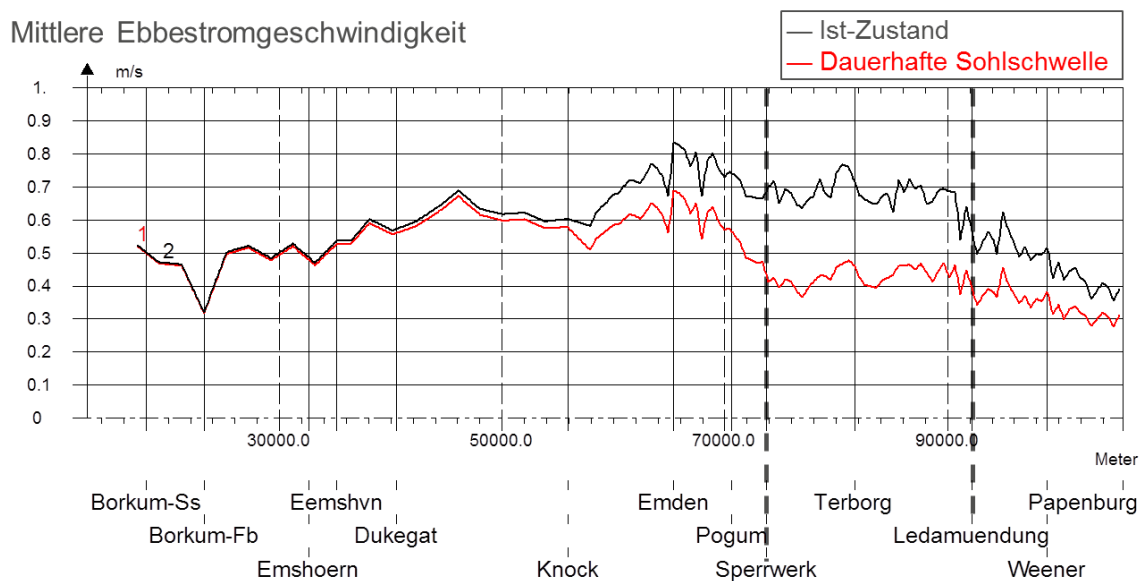
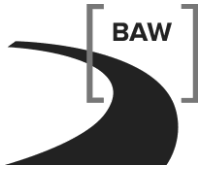


Bild 16: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).



In unmittelbarer Nähe des Emssperrwerks kommt es durch die Zunahme des Wasserstandsgradienten zwischen Unter- und Oberwasser zu einer Zunahme der maximalen und mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten, aus Sicht der Strömung jeweils hinter dem Sperrwerk.

Das Verhältnis der mittleren Flut- zu mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten verändert sich in den Abschnitten seewärts des Emssperrwerks und oberhalb der Ledamündung zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeit. Im mittleren Abschnitt zwischen Emssperrwerk und Ledamündung führt die dauerhafte Sohlschwelle zu einer Veränderung des Verhältnisses zu Gunsten des Flutstroms: In diesem Abschnitt sind die Abnahmen der Flutstromgeschwindigkeit relativ gesehen kleiner als die Abnahmen der Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 17).

Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten

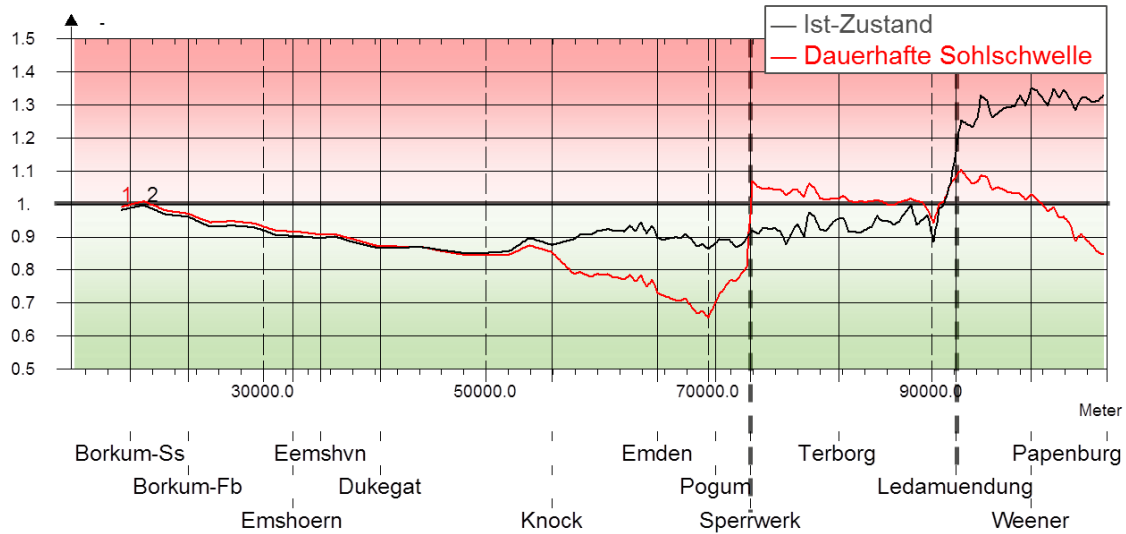


Bild 17: Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit.

5.1.2 Wirkung auf die Salzintrusion

Die dauerhafte Sohlschwelle wird zu einer verminderten Salzintrusion in das Ems-Ästuar führen (Bild 18). Dafür sind zwei Gründe zu nennen:

1. Eine veränderte barokline Zirkulation, weil sich das Tidemittelwasser als Indikator für den mittleren barotropen Druckgradienten ändert und
2. eine Veränderung der Transportweglängen, weil sich die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten verringern und die Flut- und Ebbestromdauern verändern.

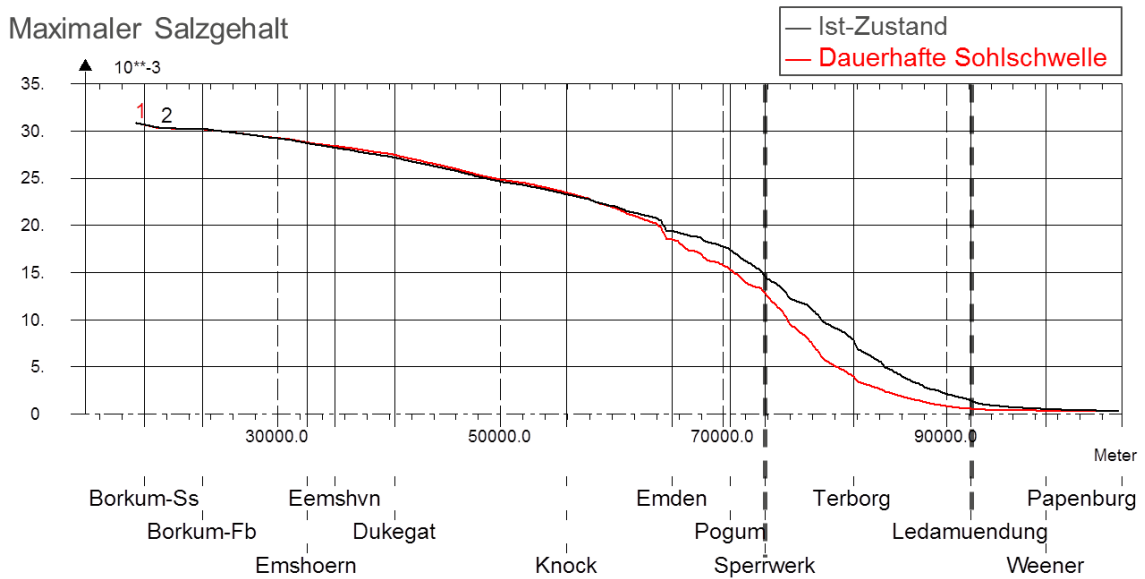


Bild 18: Maximaler Salzgehalt (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

Das Tidemittelwasser nimmt zu (Bild 19), weil das Tideniedrigwasser viel stärker angehoben wird als das Tidehochwasser abnimmt. Das Tidemittelwasser ist ein Indikator für den mittleren barotropen Druckgradienten. Je steiler das Tidemittelwasser nach oberstrom hin ansteigt, desto stärker wirkt der barotrope Druckgradient der baroklinen Zirkulation entgegen. Dazu zwei Anmerkungen:

- Damit die barokline Zirkulation Salz von der Außenems in die Unterems transportieren kann, muss im Zustand mit der dauerhaften Sohlschwelle der große barotrope Druckgradient am Emssperrwerk (Tmw-Stufe) überwunden werden. Im Ist-Zustand ist diese Stufe nicht vorhanden. Die Salzintrusion von der Außenems in die Unterems nimmt deshalb mit der dauerhaften Sohlschwelle ab.
- Stromauf vom Emssperrwerk halbiert sich die Steigung des Tidemittelwassers mit der dauerhaften Sohlschwelle im Vergleich zum Ist-Zustand. Der mittlere barotrope Druckgradient wird in der Unterems oberhalb des Emssperrwerks kleiner. Salz, das schon in der Unterems ist, wird mit Hilfe der baroklinen Zirkulation weiter nach stromauf transportiert, als im Ist-Zustand.

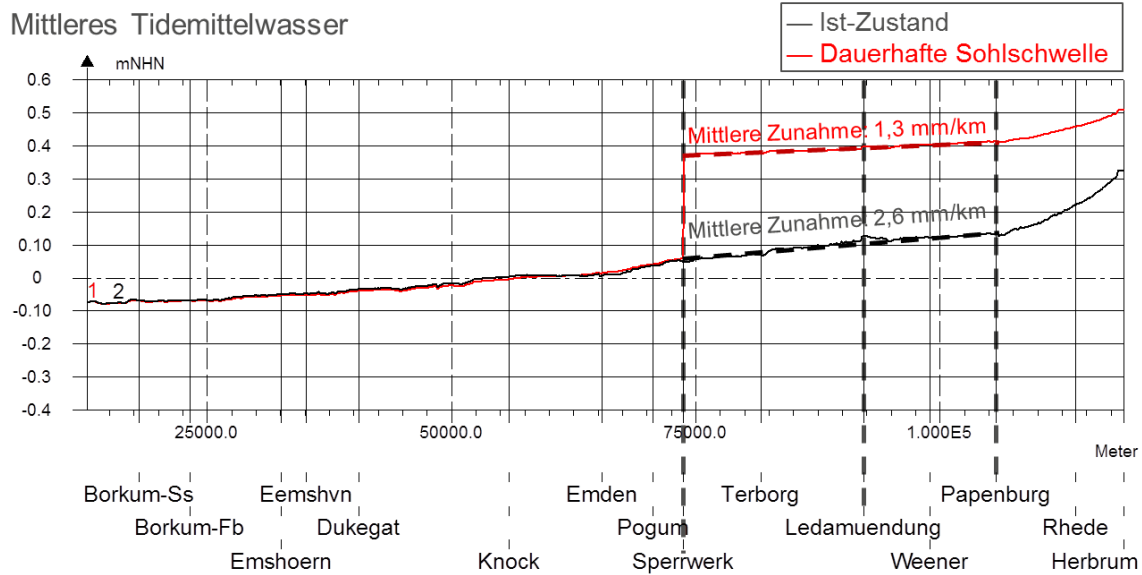


Bild 19: Mittleres Tidemittelwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot). Für den Abschnitt Ems-Kilometer 30 (stromauf Emssperrwerk) bis Ems-Kilometer 0 (Papenburg) ist eine lineare Regression durchgeführt worden. Die Steigungen dieser Geraden sind angegeben.

Zweitens führt die dauerhafte Sohlschwelle zu einer Abnahme der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und zu einer Veränderung der Flut- und Ebbestromdauern. Beides zusammen führt zu kürzeren advektiven Transportwegen des Salzes mit dem Flut- und dem Ebbestrom (Bild 20 und Bild 21).

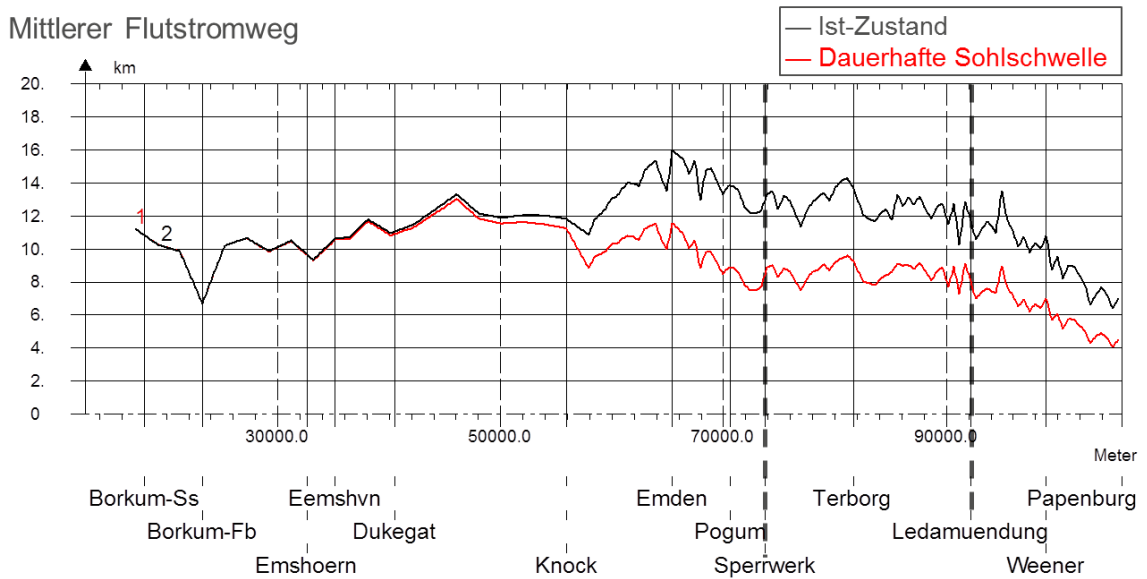


Bild 20: Mittlerer (eulerscher) Flutstromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Der Flutstromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und der Flutstromdauer.

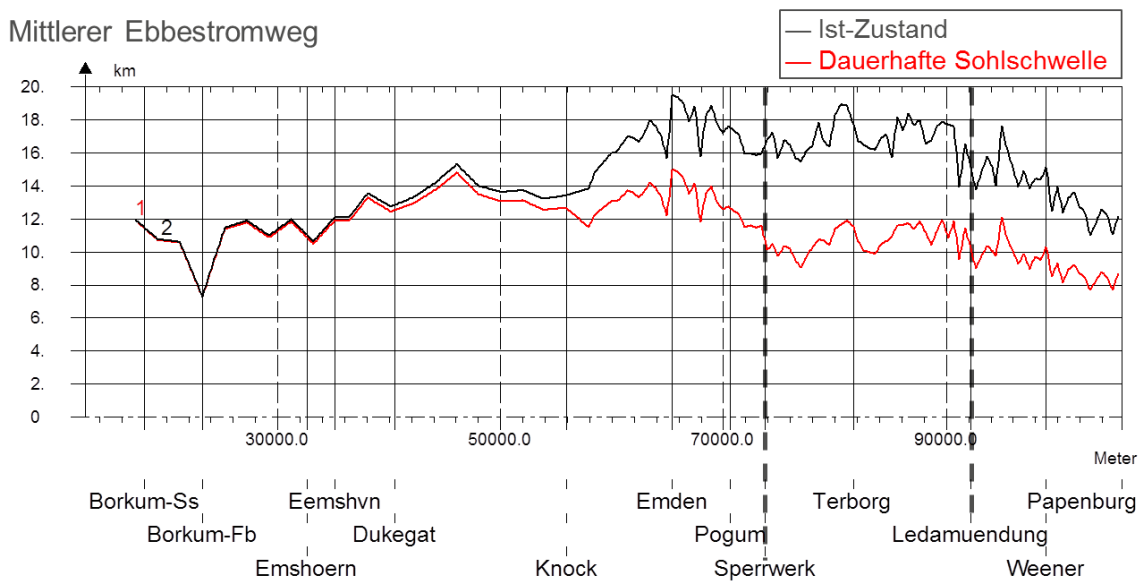


Bild 21: Mittlerer (eulerscher) Ebbestromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Der Ebbestromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit und der Ebbestromdauer.

Entscheidend ist die Veränderung der Transportwege mit dem Flutstrom im Verhältnis zu den Transportwegen mit dem Ebbestrom (Bild 22). Seewärts Knock ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Flutstromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt zu. Zwischen Knock und dem Emssperwerk ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Eb-

bestromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt ab. Zwischen Emssperrwerk und der Ledamündung ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Flutstromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt zu. Stromauf von der Ledamündung ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Ebbestromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt ab.

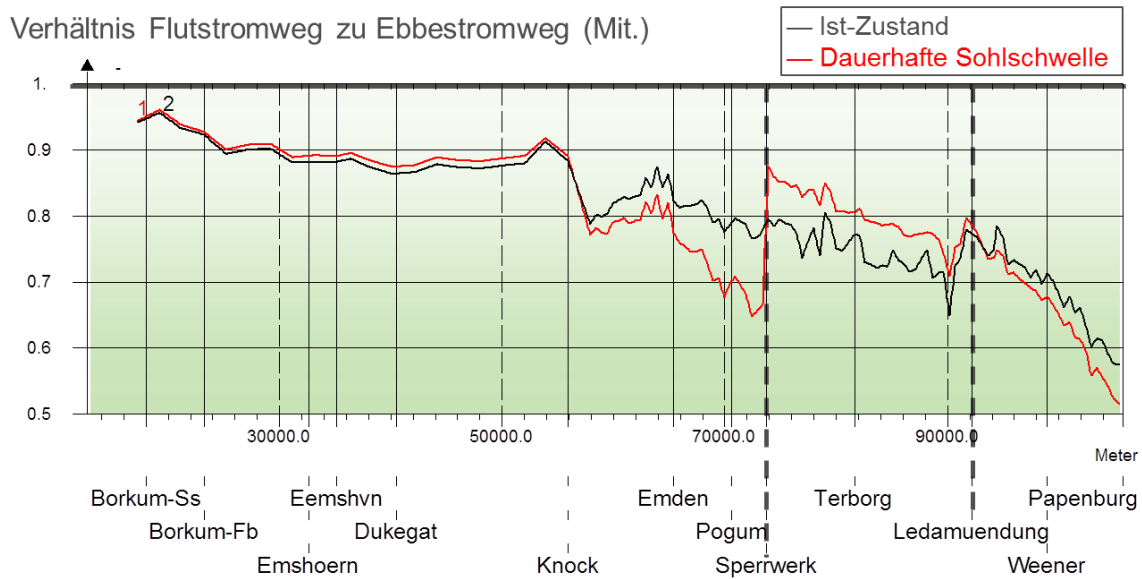


Bild 22: Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromwege im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Werte kleiner 1 (grüner Hintergrund) zeigen an, dass die Ebbestromwege größer sind als die Flutstromwege.

Letztlich ist die veränderte Salzintrusion das Ergebnis beider Prozesse. Für das hier gewählte Szenario nimmt der maximale Salzgehalt durch die dauerhafte Sohlschwelle im Resultat um bis zu 5 ppt ab.

5.1.3 Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt

Der Schwebstoffgehalt wird in der Unterems und im Emden Fahrwasser abnehmen (Bild 23 und Bild 24), weil die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten abnehmen, sich dadurch die Bodenschubspannungen reduzieren und der Erosionsfluss von Sedimenten vom Boden in den Wasserkörper abnimmt. Der hellgrau hinterlegte Kasten in Bild 24 zeigt, dass der mittlere Schwebstoffgehalt auch in der Außenems seewärts von Knock abnimmt.

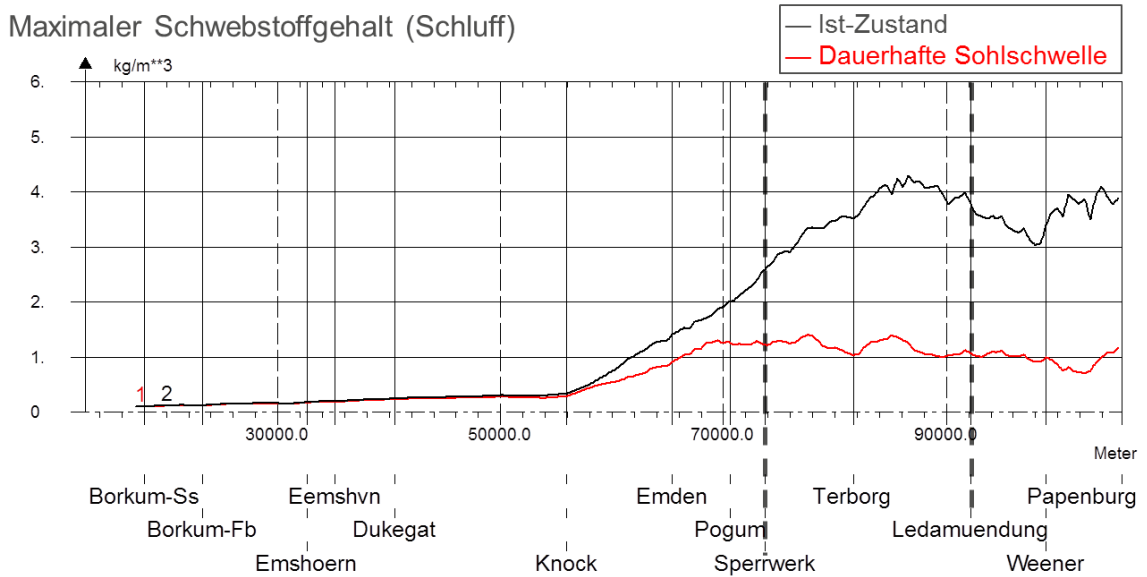


Bild 23: Maximaler Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

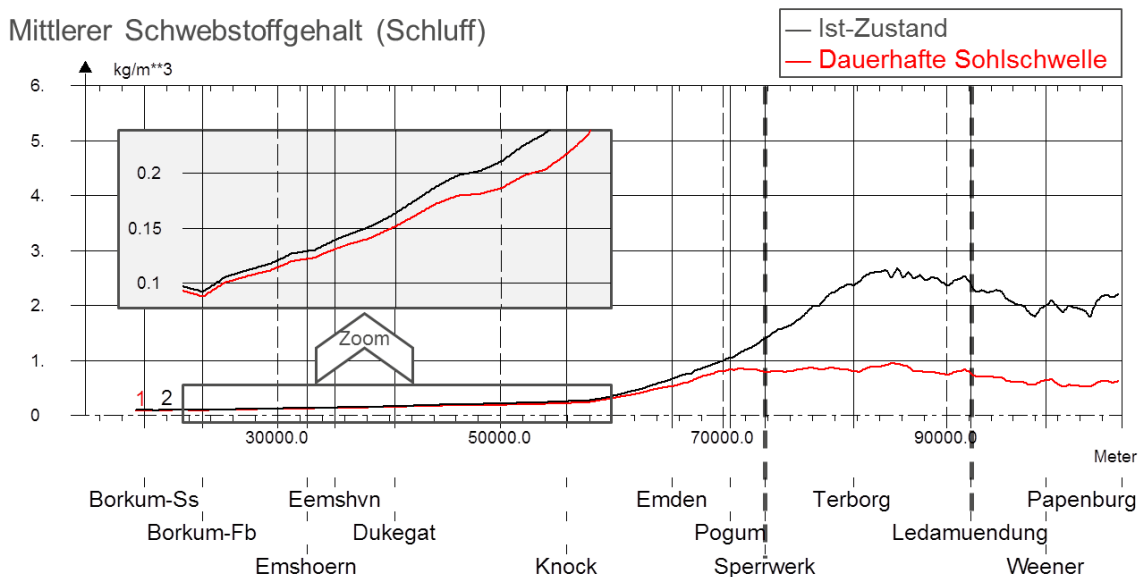


Bild 24: Mittlerer Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Für den hellgrau hinterlegten Kasten links oben ist der Wertebereich für den Schwebstoffgehalt verändert worden, um die Unterschiede in der Außenems hervorzuheben.

Die Bodenschubspannung ist proportional vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. D.h., dass hohe Strömungsgeschwindigkeiten einen überproportionalen Einfluss auf die Bodenschubspannung und damit auf den Erosionsfluss haben. Deshalb sollen hier auch die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten dargestellt werden, die ebenfalls

durch die dauerhafte Sohlschwelle stromauf von Knock reduziert werden (Bild 25 und Bild 26).

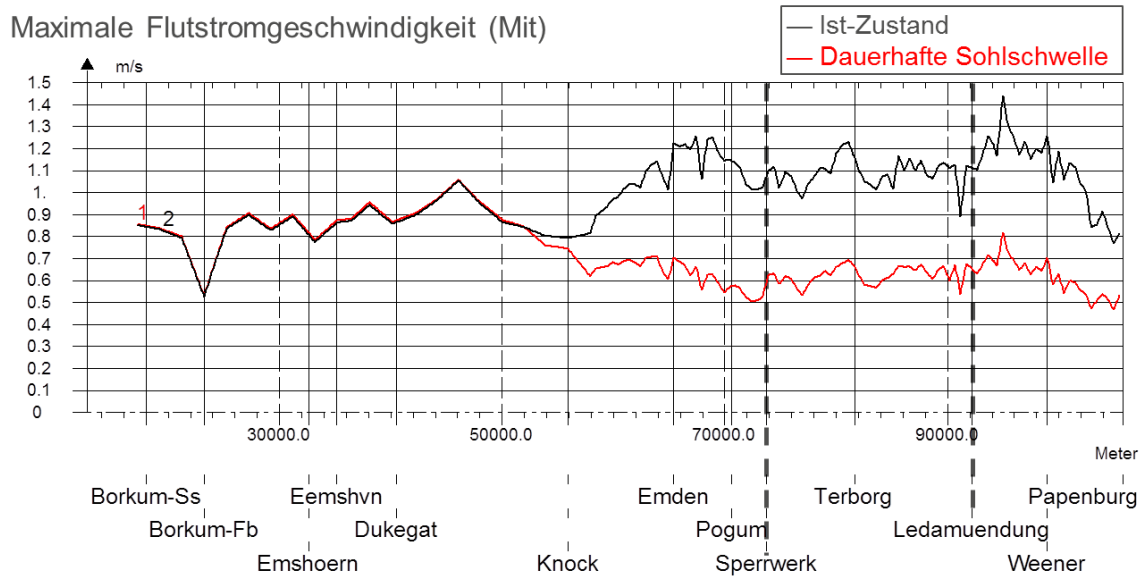


Bild 25: Maximale Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

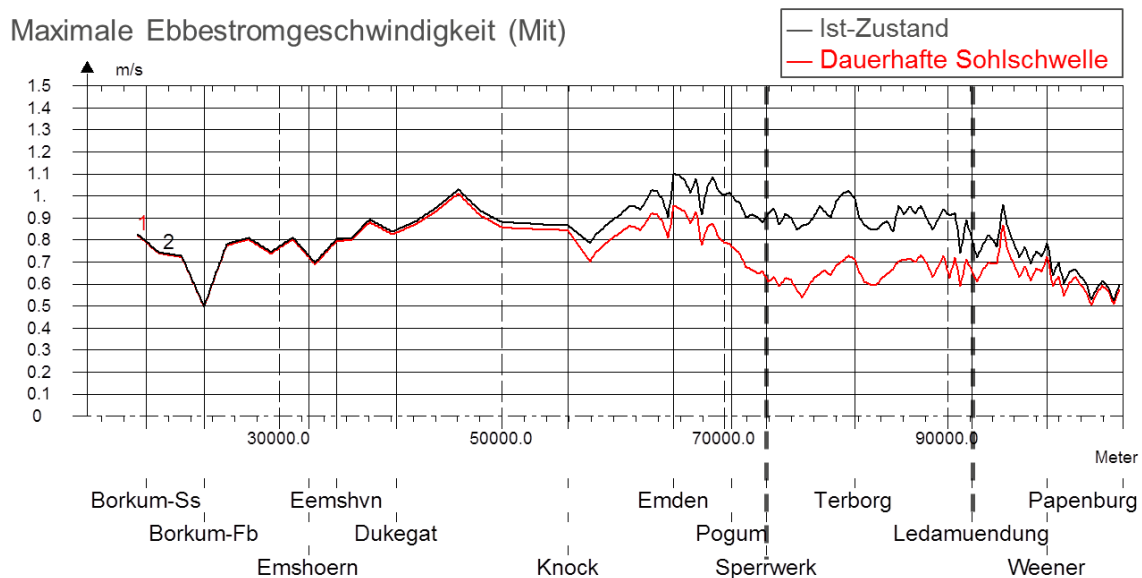


Bild 26: Maximale Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung).

Das Verhältnis der maximalen Flut- zu maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten verändert sich stromauf von Knock zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeit. Seewärts von Knock

führt die dauerhafte Sohlschwelle zu einer Veränderung des Verhältnisses zu Gunsten des Flutstroms: In diesem Abschnitt sind entweder die Abnahmen der Flutstromgeschwindigkeit relativ gesehen kleiner als die Abnahmen des Ebbestromgeschwindigkeit oder die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten nehmen zu anstatt ab.

Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten

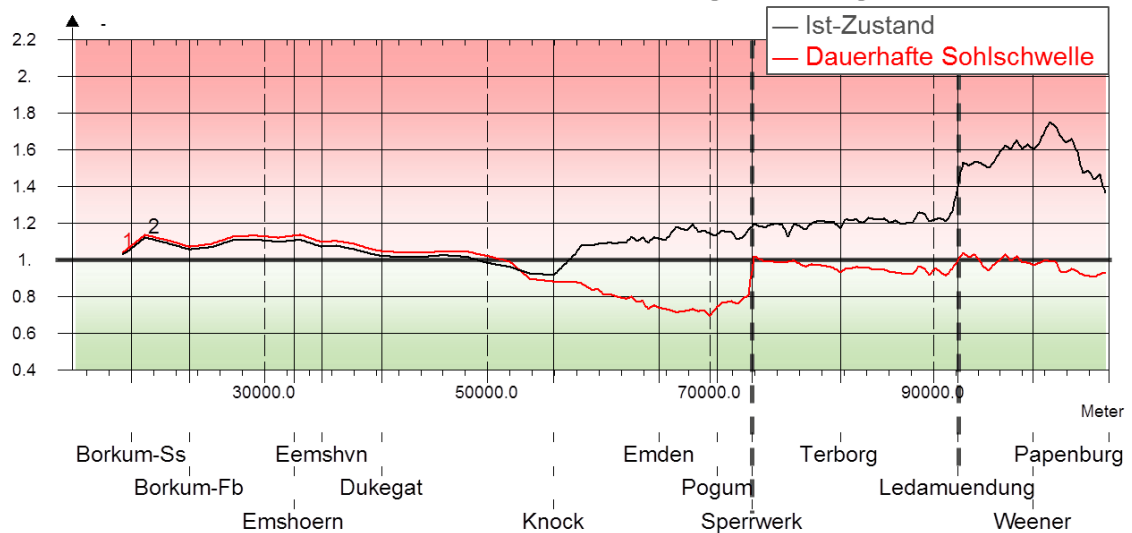


Bild 27: Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit.

Der Transport von Schwebstoffen nimmt sowohl im Flutstrom als auch im Ebbstrom im Ems-Ästuar ab, weil einerseits das Flut- und Ebbestromvolumen und andererseits der Schwebstoffgehalt abnimmt.

Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom

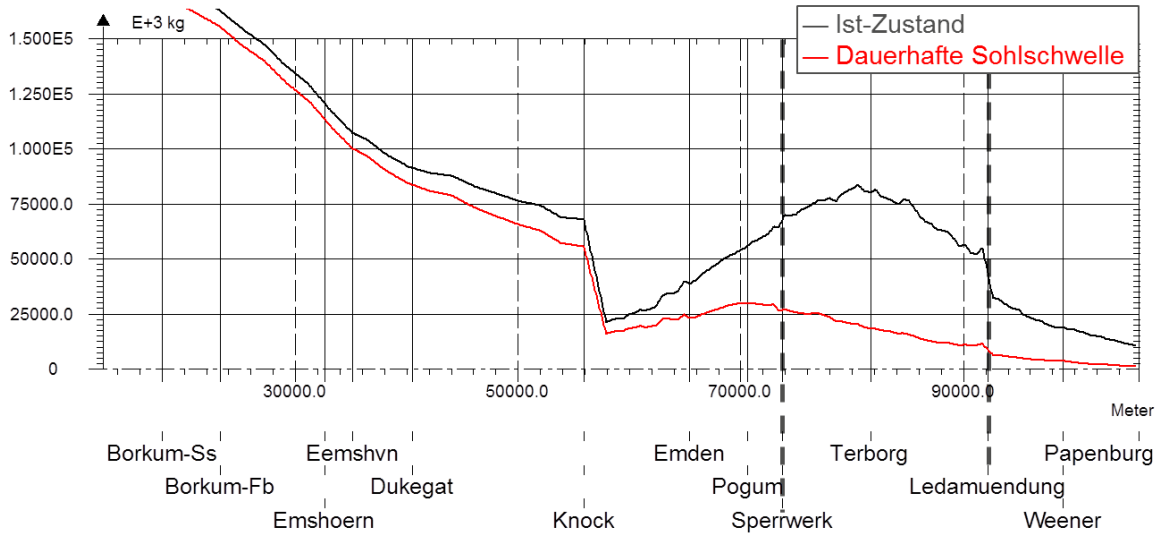


Bild 28: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Integration).

Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom

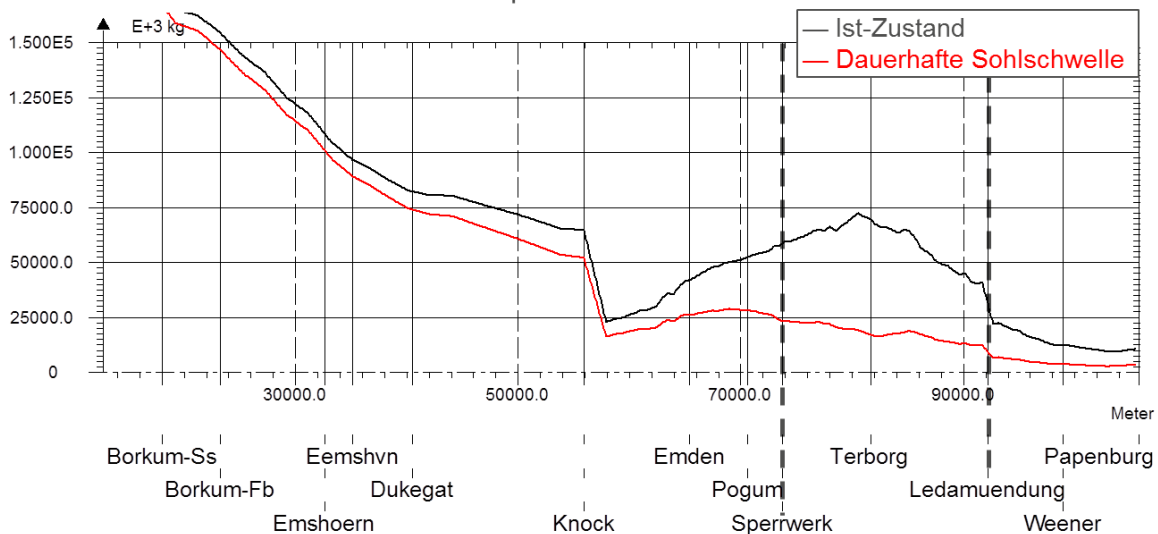


Bild 29: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Integration).

Die Differenz des Schwebstofftransports (Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom minus Schwebstofftransport mit dem Flutstrom) ist der residuelle Schwebstoff-Transport. Er zeigt im Ist-Zustand an, dass sowohl in der Außenems als auch in der Unterems der Flutstrom mehr Schwebstoffe nach stromauf transportiert, als der Ebbestrom zurück in Richtung Nordsee (Bild 30).

Mit der dauerhaften Sohlschwelle wird in der Unterems der residuelle Schwebstoff-Transport nach stromauf erheblich vermindert, bzw. in Abschnitten auch in einen ebbstrom-dominanten Schwebstoff-Transport umgekehrt.

In der Außenems ändert sich der residuelle Schwebstoff-Transport nur wenig. Es bleibt beim flutstrom-dominanten Schwebstoff-Transport, der tendenziell verstärkt wird.

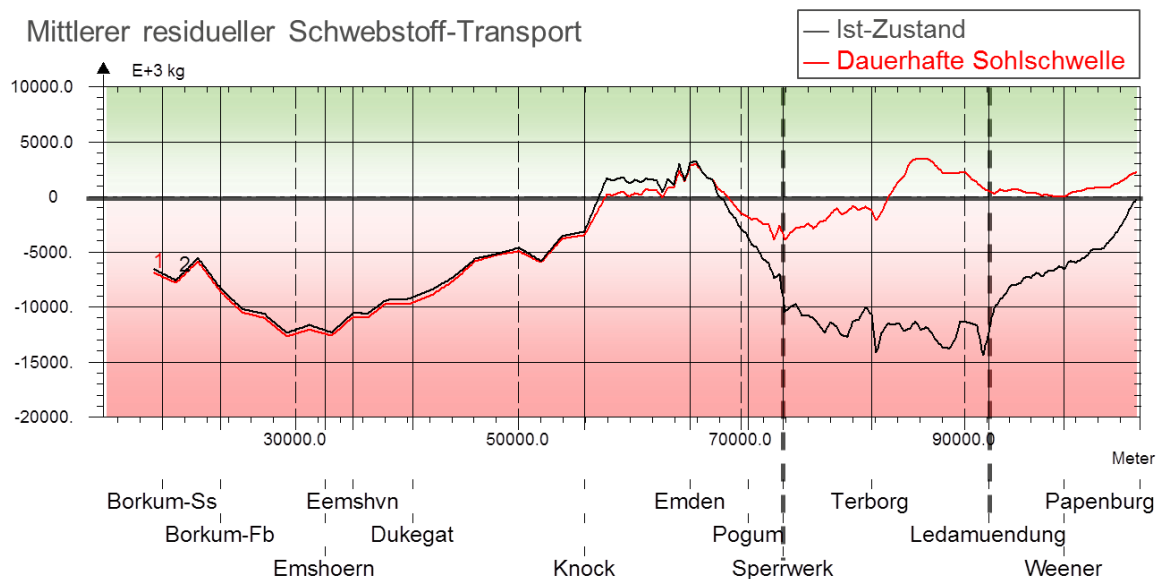
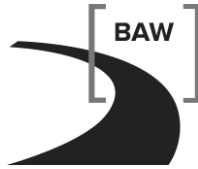


Bild 30: Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom größer ist als der Transport mit 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.

5.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Durch die dauerhafte Sohlschwelle wird die Tidedynamik stromauf vom Emssperrwerk gedämpft, weil der Querschnitt am Emssperrwerk bedingt durch die Einengung weniger leistungsfähig ist. Deshalb nehmen das Flut- und Ebbstromvolumen ab. Daraus resultieren eine Abnahme des Tidehochwassers und eine dem Betrag nach größere Anhebung des Tideniedrigwassers. Der Tidehub nimmt ab. Seewärts des Emssperrwerks sinkt das Tideniedrigwasser ab, weil weniger Wasservolumen aus der Unterems zur Stützung des Tideniedrigwassers nachströmt als im Ist-Zustand. Entsprechend nimmt der Tidehub zu.

Die Flutstrom- und Ebbestromkenterpunkte verspäten sich stromauf des Emssperrwerks im Vergleich zum Ist-Zustand, um über eine verlängerte Dauer des jeweiligen Volumenstroms



die reduzierte Leistungsfähigkeit zu kompensieren. Im Abschnitt zwischen Ledamündung und Emssperrwerk sind die Verspätungen der Kenterungen des Flut- und Ebbstroms in etwa gleich groß, so dass die Flut- und Ebbstromdauer in etwa unverändert zum Ist-Zustand bleibt. Seewärts vom Emssperrwerk bis etwa in den Gatjebogen und stromauf von der Ledamündung führen die unterschiedlichen Veränderungen der Kenterungen des Flut- und Ebbstroms dazu, dass sich die Flutstromdauer verlängert und die Ebbstromdauer verkürzt.

Im Abschnitt zwischen Ledamündung und Emssperrwerk, wo die Flut- und Ebbstromdauer in etwa unverändert zum Ist-Zustand bleiben, führt die Abnahme des Flut- und Ebbstromvolumens zwingend zu einer Abnahme der mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten. Seewärts des Emssperrwerks und stromauf der Ledamündung nimmt die Flutstromdauer zu, deshalb müssen in diesen Abschnitten die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten in zusätzlichem Maße kleiner werden, wohingegen in diesen Abschnitten die Ebbstromdauer abnimmt und deshalb die mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten weniger kräftig abnehmen.

Der Schwebstoffgehalt wird in der Unterems und im Emdrer Fahrwasser abnehmen, weil die Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten abnehmen, sich dadurch die Bodenschubspannungen reduzieren und der Erosionsfluss von Sedimenten vom Boden in den Wasserkörper abnimmt. Der residuelle Stromauf-Transport ist vermindert, streckenweise sogar gekehrt, weil die Flutstromdauern seewärts des Emssperrwerks und stromauf der Ledamündung zunehmen und deshalb die Flutstromgeschwindigkeiten stärker reduziert werden als die Ebbstromgeschwindigkeiten. Deshalb ist die dauerhafte Sohlschwelle eine Variante, die den Schwebstoff-Haushalt der Unterems positiv beeinflusst.

Nachteilig ist, dass die dauerhafte Sohlschwelle nur durch einen ergänzenden Anbau in der Nähe zum Emssperrwerk realisiert werden kann und dass die ununterbrochene Querschnittseinengung zu einer eingeschränkten ökologischen Durchgängigkeit führt. Weiterhin wäre der Bau einer Schleuse für die Schifffahrt erforderlich (BAW, 2015), weil die dauerhafte Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist.

5.2 Flexible Sohlschwelle

Das Emssperrwerk besteht aus 7 Toren und 6 Pfeilern dazwischen. Die Torhöhe der Tore kann unabhängig von den anderen Toren variiert werden.

Im Folgenden werden Varianten untersucht, die sich dadurch vom Ist-Zustand unterscheiden, dass die Sperrwerkstore im Rhythmus der Tide teilgeschlossen und geöffnet werden. Im offenen Zustand sind alle Sperrwerkstore aus dem Wasser gehoben, bzw. der Drehsegmentverschluss der Hauptschiffahrtsöffnung ist in den Dremmel gedreht und die Tide kann ungehindert ein- oder auslaufen. Im teilgeschlossenen Zustand (im Folgenden auch der aktive Zustand der Sohlschwelle genannt) ist mindestens ein Sperrwerkstor entweder voll-

ständig geschlossen oder so eingetaucht, bzw. gedreht, dass der hydrodynamisch wirksame Querschnitt verringert ist.

5.2.1 Flexible Sohlschwelle nur im Flutstrom oder nur im Ebbestrom

Beiden hier untersuchten Varianten einer flexiblen Sohlschwelle ist die Torstellung im aktiven Zustand gemeinsam. Im teilgeschlossenen Zustand sind die Nebenöffnungen NÖ1 bis NÖ5 und die Binnenschiffahrtsöffnung (BSÖ) geschlossen. Der Drehsegmentverschluss wird so gedreht, dass die Oberkante des Verschlusses bei NHN-4m liegt (siehe Bild 31).

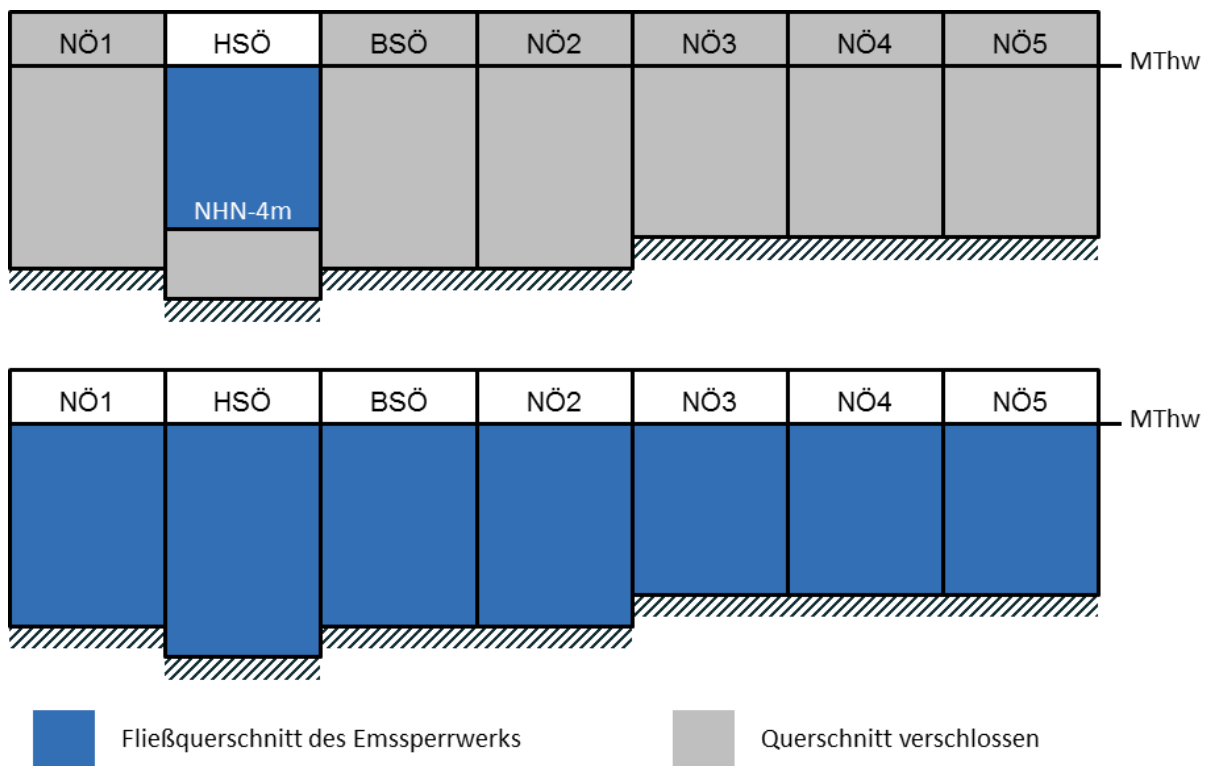


Bild 31: Querschnitt des Emssperrwerks im teilgeschlossenen Zustand (oben) und im offenen Zustand (unten). Im teilgeschlossenen Zustand sind die Nebenöffnungen NÖ1 bis NÖ5 und die Binnenschiffahrtsöffnung (BSÖ) geschlossen. Der Drehsegmentverschluss wird so gedreht, dass die Oberkante des Verschlusses bei NHN-4m liegt.

Die Querschnittseinengung im aktiven Zustand der Sohlschwelle ist abhängig vom Wasserstand, beträgt aber für typische Wasserstände zwischen NHN-2m und NHN+2m immer mehr als 90 % (Bild 32).

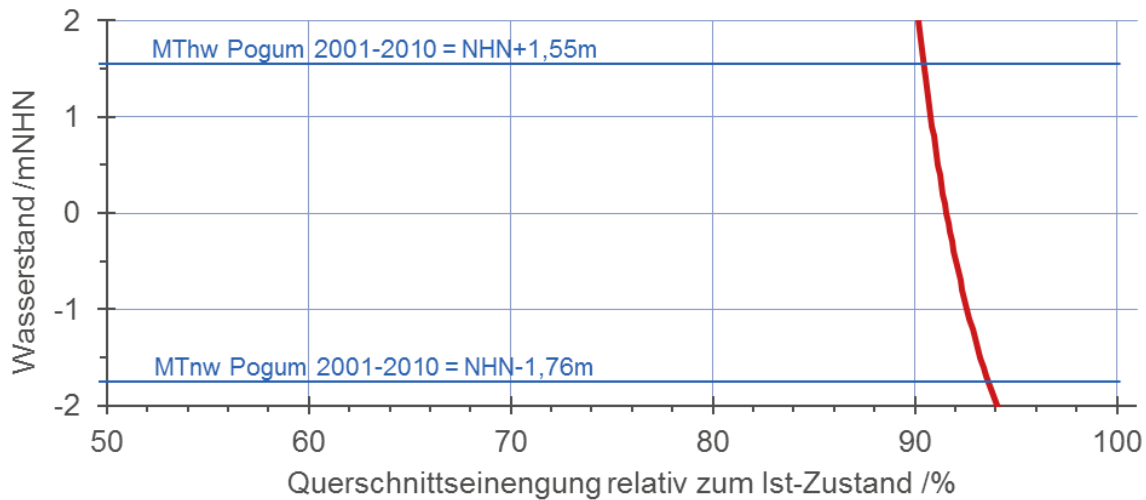


Bild 32: Querschnittseinengung der flexiblen Sohlschwelle mit einer Schwellen-Oberkante von NHN-4m in der HSÖ (alle weiteren Tore geschlossen) relativ zum Ist-Zustand in Rot.

Bei diesen beiden Varianten werden die Sperrwerkstore entweder im Flutstrom oder im Ebbstrom in den aktiven Zustand der Sohlschwelle gebracht. D.h., dass bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom die HSÖ im Flutstrom in den teilgeschlossenen Zustand und die anderen sechs Sperrwerkstore in den komplett geschlossenen Zustand versetzt werden und im Ebbstrom alle sieben Sperrwerkstore offen stehen. Der Flutstrom wird gedrosselt. Der Ebbstrom kann ungehindert das Emssperrwerk passieren. Bei der flexiblen Sohlschwelle im Ebbstrom wird die HSÖ im Ebbstrom in den teilgeschlossenen Zustand und die anderen sechs Sperrwerkstore in den komplett geschlossenen Zustand versetzt. Im Flutstrom sind alle Tore geöffnet. Der Ebbstrom wird gedrosselt, der Flutstrom kann ungehindert das Emssperrwerk passieren (Bild 33).

Ziel dieses Vergleichs ist es zu identifizieren, ob grundsätzlich eine flexible Sohlschwelle im Ebbe- oder im Flutstrom mit Blick auf den Schwebstoff-Haushalt zu bevorzugen ist.

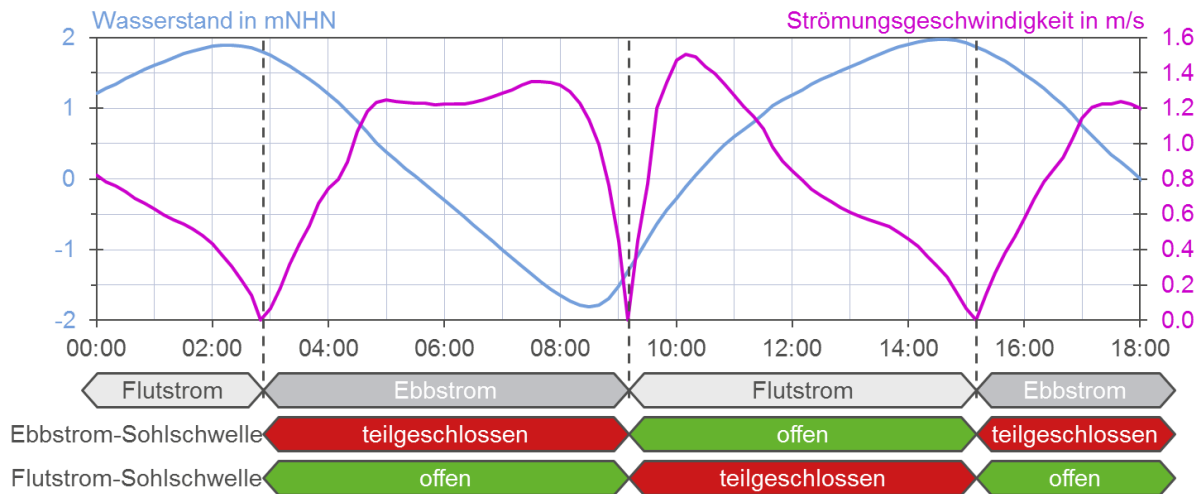


Bild 33: Skizze des zeitlichen Verlaufs der Querschnittseinengung für die flexible Sohlschwelle im Ebb- und Flutstrom (unten). Oben in Blau eine Wasserstandsganglinie und in Rot eine Strömungsganglinie am Emssperrwerk für den Ist-Zustand. Während die Sohlschwelle aktiv ist können sich die Ganglinien am Emssperrwerk erheblich ändern.

Die folgenden Ergebnisse beruhen auf der Masterarbeit von Inga Dirks (Dirks, 2015), die sie in Zusammenarbeit mit der BAW im ersten Halbjahr 2015 erstellt hat. So hat Dirks u.a. auch die Höhe des Drehsegmentverschlusses der HSÖ mit -4m NHN so festgelegt, dass die Tideniedrigwasseranhebung der flexiblen Sohlschwelle mit dem Ebbstrom der Tideniedrigwasseranhebung mit der dauerhaften Sohlschwelle am Emssperrwerk entspricht. Die Darstellungen wurden allerdings für diesen Ergebnisbericht neu erzeugt, weil einerseits hier weniger Varianten dargestellt werden und andererseits hier die Farbwahl für die Varianten an die Darstellungen des vorigen Kapitels angepasst ist.

In allen Darstellungen sind zwei Vergleichszustände eingezeichnet. Erstens der Ist-Zustand (s.a. Kapitel 4.1) in Schwarz und zweitens die dauerhafte Sohlschwelle (s.a. Kapitel 5.1) in Rot. Die Farbwahl entspricht der Wahl in Kapitel 5.1. Zusätzlich sind die Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Ebbstrom in Grün und im Flutstrom in Magenta eingezeichnet.

5.2.1.1 Wirkung auf die Hydrodynamik

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ist der hydraulisch wirksame Querschnitt am Emssperrwerk nur im Flutstrom deutlich reduziert. Die Folge ist, dass im Flutstrom weniger Wasservolumen pro Zeiteinheit den Querschnitt Richtung Wehr Herbrum passieren kann. Daraus folgt, dass das Flutstromvolumen reduziert ist (Bild 34) und das Tidehochwasser stromauf vom Emssperrwerk etwa einen halben Meter absinkt (Bild 35).

Mittleres Flutstromvolumen

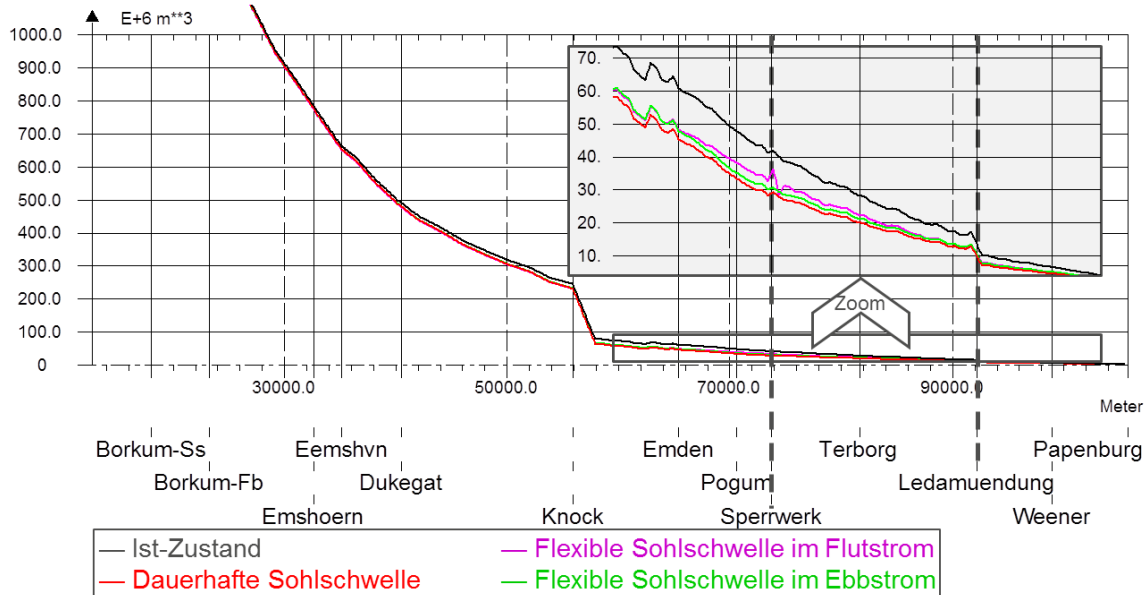


Bild 34: Mittleres Flutstromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Integration). Für den hellgrau hinterlegten Kasten rechts oben ist der Wertebereich verändert worden, um die Unterschiede in der Unterems hervorzuheben.

Mittleres Tidehochwasser

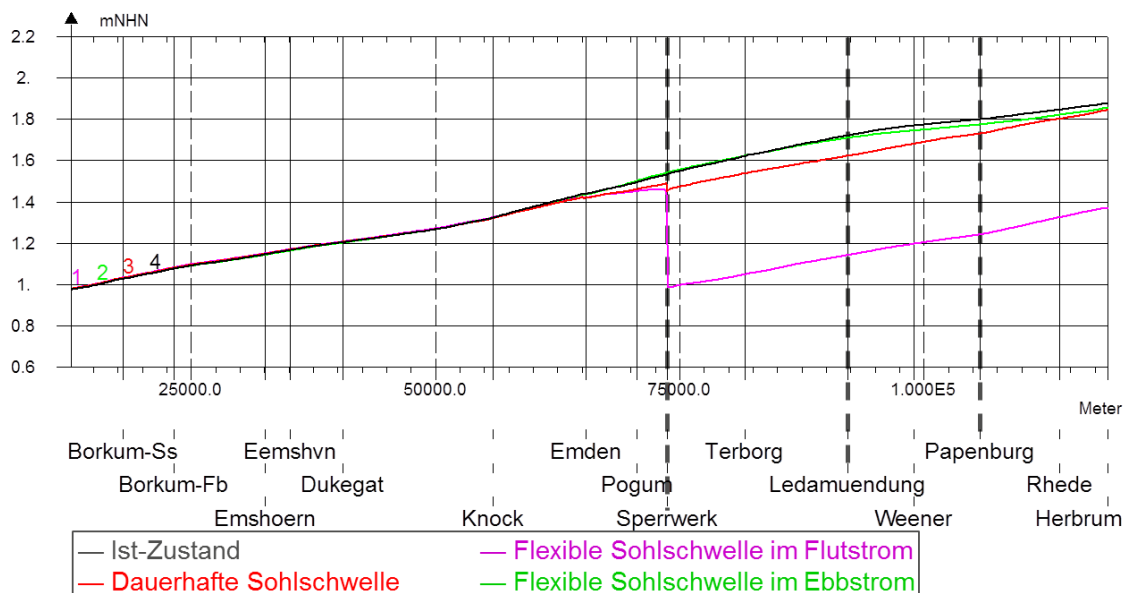


Bild 35: Mittleres Tidehochwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün).

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Ebbstrom ist der hydraulisch wirksame Querschnitt am Emssperrwerk nur im Ebbstrom deutlich reduziert. Die Folge ist, dass im Ebbstrom weniger Wasservolumen pro Zeiteinheit den Querschnitt Richtung Nordsee passieren kann. Daraus folgt, dass das Ebbstromvolumen reduziert ist (Bild 36) und das Tideniedrigwasserwasser stromauf vom Emssperrwerk etwa 1,2 m angehoben ist (Bild 37).

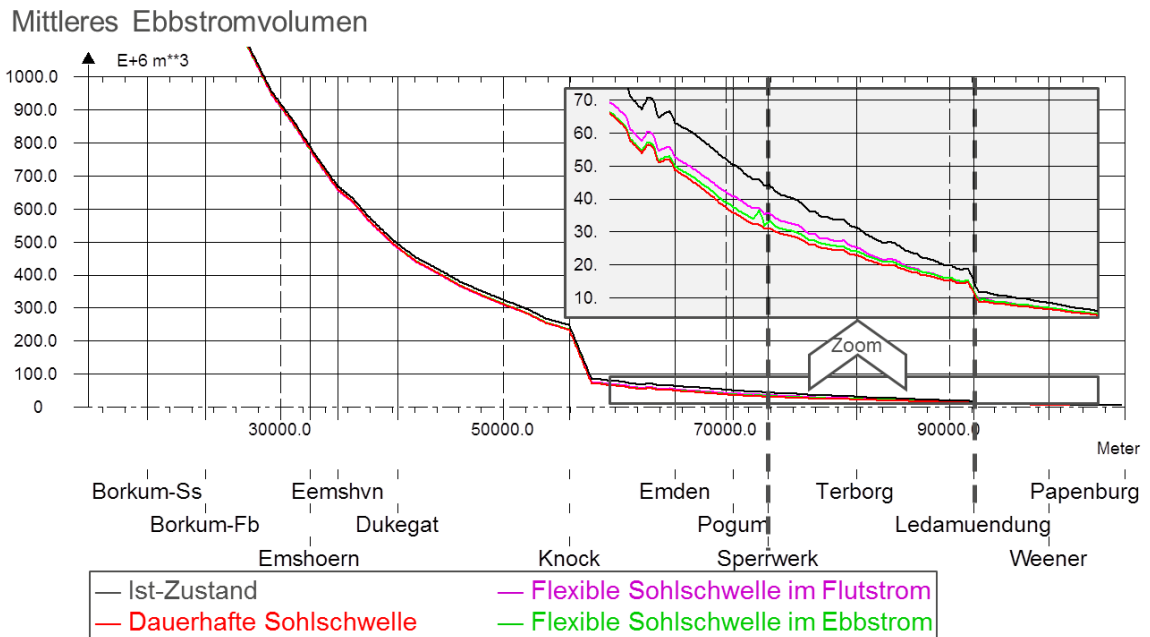


Bild 36: Mittleres Ebbstromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Integration). Für den hellgrau hinterlegten Kasten rechts oben ist der Wertebereich verändert worden, um die Unterschiede in der Unterems hervorzuheben.

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom kann der Ebbstrom den Querschnitt am Emssperrwerk ungehindert passieren. Deshalb ist das Tideniedrigwasser im Vergleich zum Ist-Zustand kaum verändert (Bild 37). Das Ebbstromvolumen ist wie das Flutstromvolumen reduziert (Bild 36), weil der Ebbstrom auf einem niedrigeren Niveau beginnt (Absenkung des Tidehochwassers) und auf etwa gleichem Niveau endet (jeweils bezogen auf den Ist-Zustand).

Mittleres Tideniedrigwasser

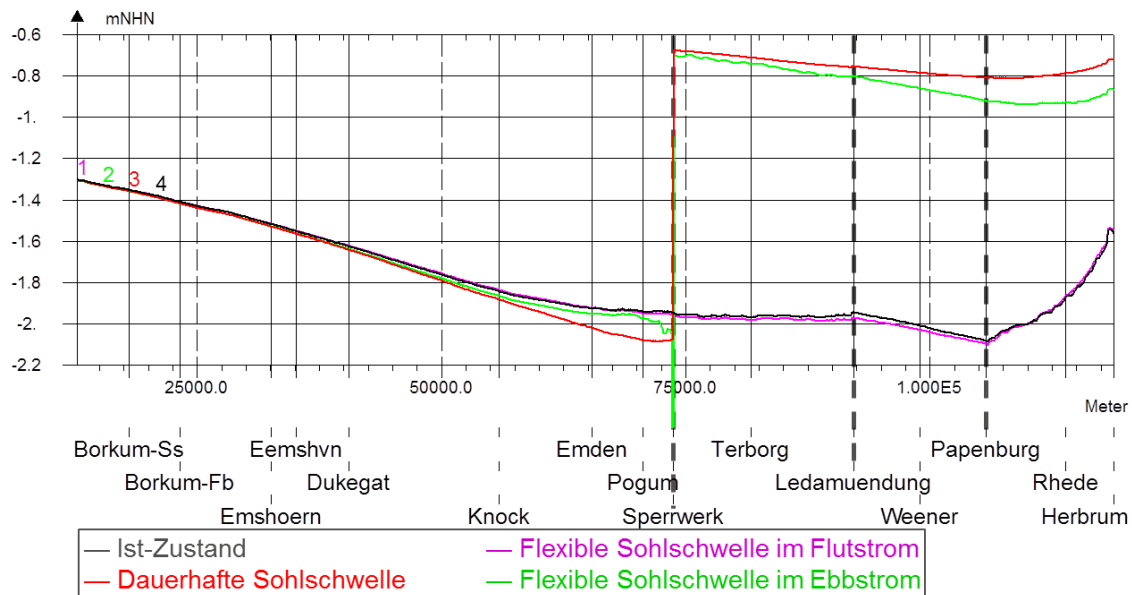


Bild 37: Mittleres Tideniedrigwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün).

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom kann der Flutstrom den Querschnitt am Emssperrwerk ungehindert passieren. Deshalb ist das Tidehochwasser im Vergleich zum Ist-Zustand kaum verändert (Bild 35). Das Flutstromvolumen ist wie das Ebbstromvolumen reduziert (Bild 34), weil der Flutstrom auf einem höheren Niveau beginnt (Anhebung des Tideniedrigwassers) und auf etwa gleichem Niveau endet (jeweils bezogen auf den Ist-Zustand).

Beide Varianten der flexiblen Sohlschwelle reduzieren das Flut- und Ebbstromvolumen, annähernd in der Größenordnung, wie die dauerhafte Sohlschwelle.

Der Tidehub nimmt stromauf vom Emssperrwerk deutlich ab. Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom etwa um das Maß der Tidehochwasser-Absenkung und bei einer flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom betragsmäßig etwa um das Maß der Anhebung des Tideniedrigwassers. Seewärts vom Emssperrwerk führt bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom die Absenkung des Tidehochwassers zu einer geringen Absenkung des Tidehubs. Die flexible Sohlschwelle im Ebbestrom führt seewärts des Emssperrwerks zu einer Abnahme des Tideniedrigwassers und deshalb entsprechend zu einer Zunahme des Tidehubs (Bild 38).

Mittlerer Tidehub

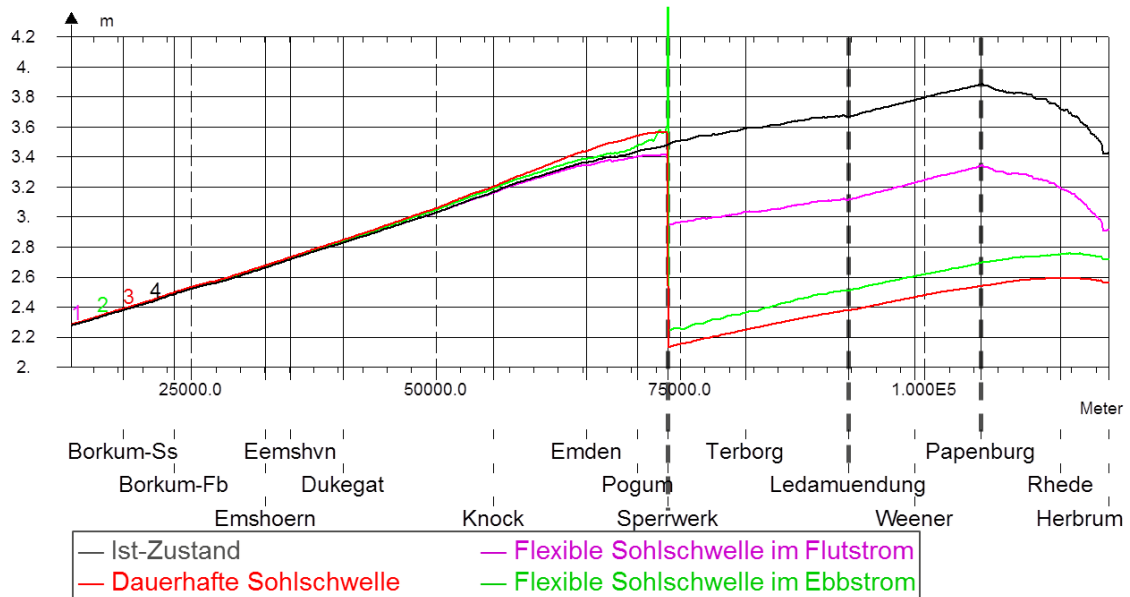


Bild 38: Mittlerer Tidehub in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün).

Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom führt zu einer Verspätung des Flutstromkenterpunktes im Vergleich zum Ist-Zustand (Bild 39), um über eine verlängerte Dauer des jeweiligen Volumenstroms die reduzierte Leistungsfähigkeit zu kompensieren. Der Unterschied beträgt zwischen dem Emssperrwerk und der Ledamündung etwa 1 Stunde und nimmt Richtung Papenburg weiter zu. Ebenso führt die flexible Sohlschwelle im Ebbstrom zu einer Verspätung des Ebbestromkenterpunktes im Vergleich zum Ist-Zustand (Bild 40). Hier beträgt die Verspätung etwa eine halbe Stunde ab Emssperrwerk bis Papenburg.

Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom lässt den Ebbstrom am Emssperrwerk ungehindert passieren. Deshalb wird sich mit dieser Variante der Ebbestromkenterpunkt nicht verspäten (Bild 40). Ebenso verhält es sich mit der flexiblen Sohlschwelle im Ebbstrom und dem Flutstromkenterpunkt: Die flexible Sohlschwelle im Ebbstrom lässt den Flutstrom am Emssperrwerk ungehindert einlaufen. Deshalb wird sich mit dieser Variante der Flutstromkenterpunkt nicht verspäten (Bild 39).

Daraus folgt, dass bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom die Verspätung des Flutstromkenterpunktes zu einer Verlängerung der Flutstromdauer führt (Bild 41). Die Ebbestromdauer verkürzt sich entsprechend (Bild 42). Bei der flexiblen Sohlschwelle im Ebbstrom führt die Verspätung des Ebbestromkenterpunktes zu einer Verlängerung der Ebbestromdauer (Bild 42). Die Flutstromdauer verkürzt sich entsprechend (Bild 41). Dies ist der entscheidende Mechanismus, der zu einer deutlichen Veränderung der Tide-Asymmetrie führt, denn die

Verlängerung der Flutstromdauer führt zu niedrigeren mittleren Flutstromgeschwindigkeiten bei gleichem Flutstromvolumen, während die Verkürzung der Flutstromdauer zu höheren mittleren Flutstromgeschwindigkeiten bei gleichem Flutstromvolumen führt.

Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung

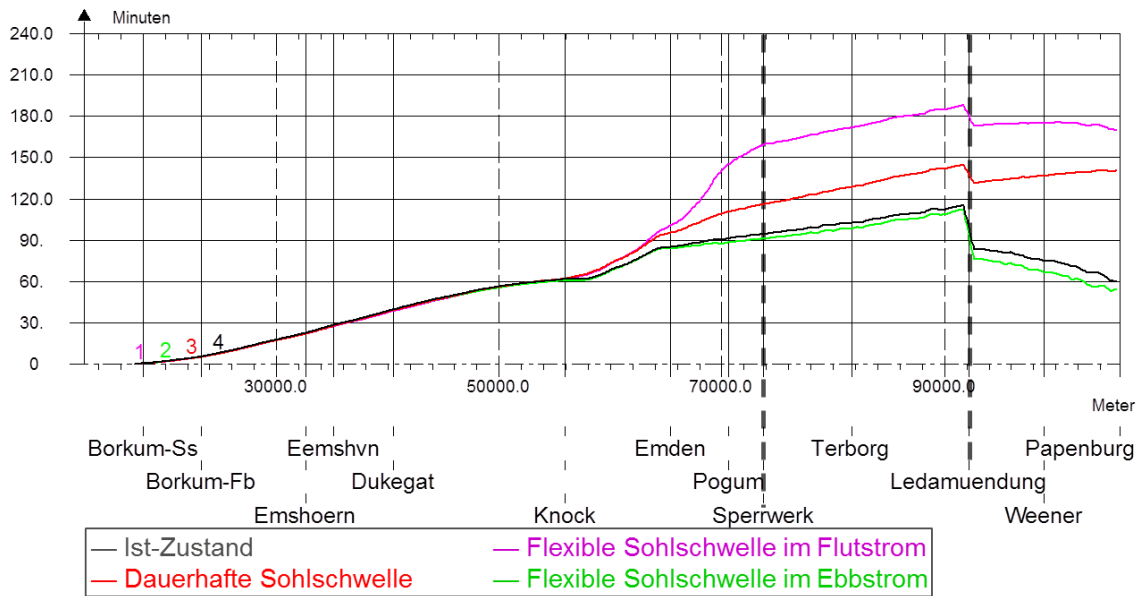


Bild 39: Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Mittlere Laufzeit der Ebbstromkenterung

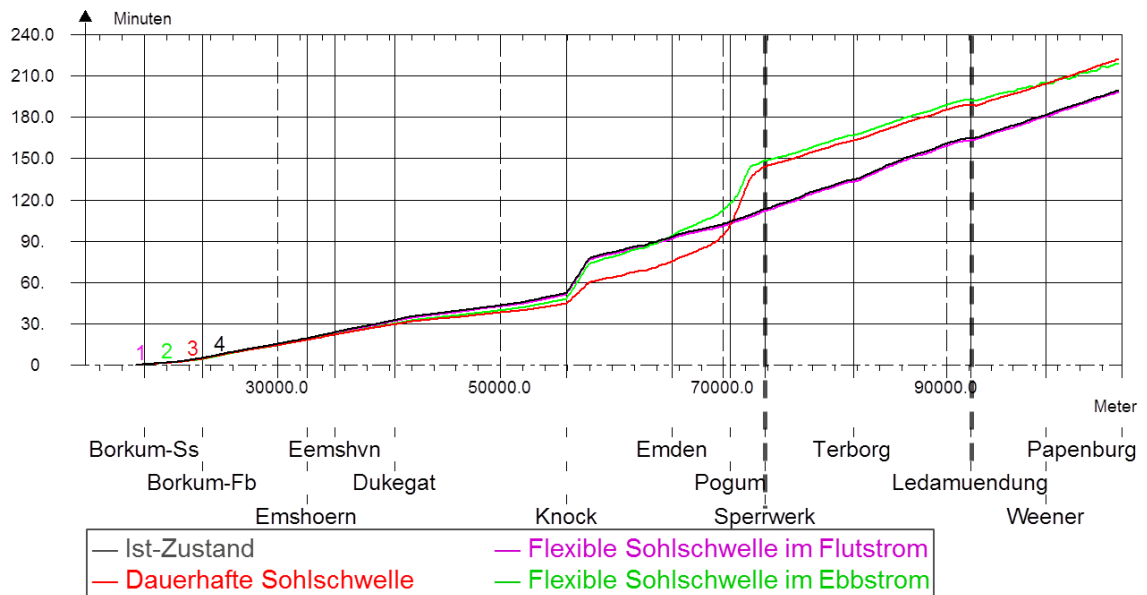


Bild 40: Mittlere Laufzeit der Ebbstromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Mittlere Flutstromdauer

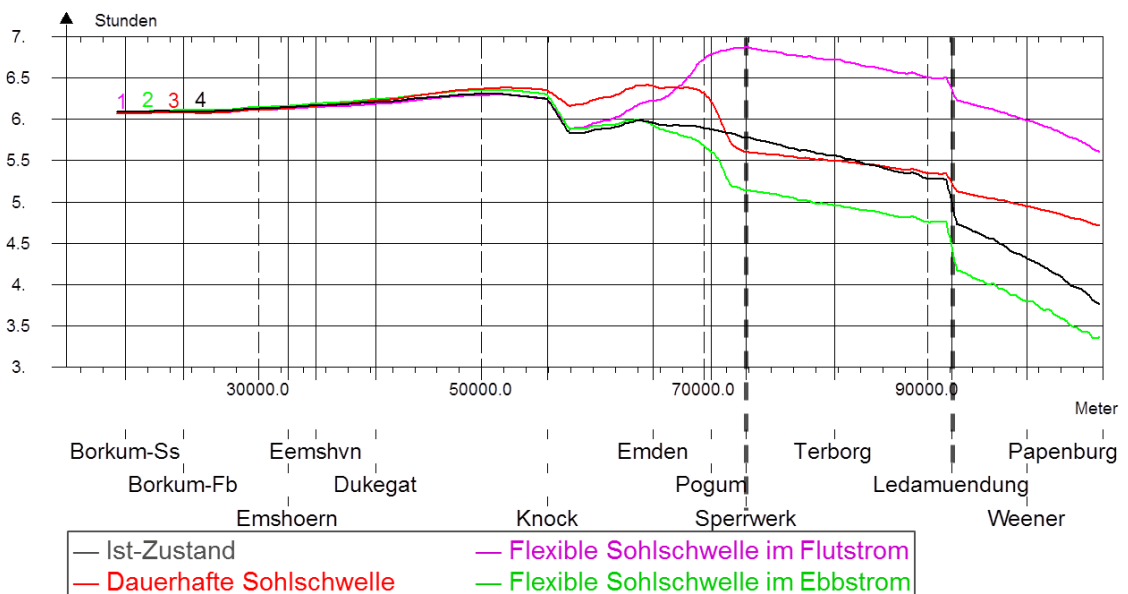


Bild 41: Mittlere Flutstromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Mittlere Ebbestromdauer

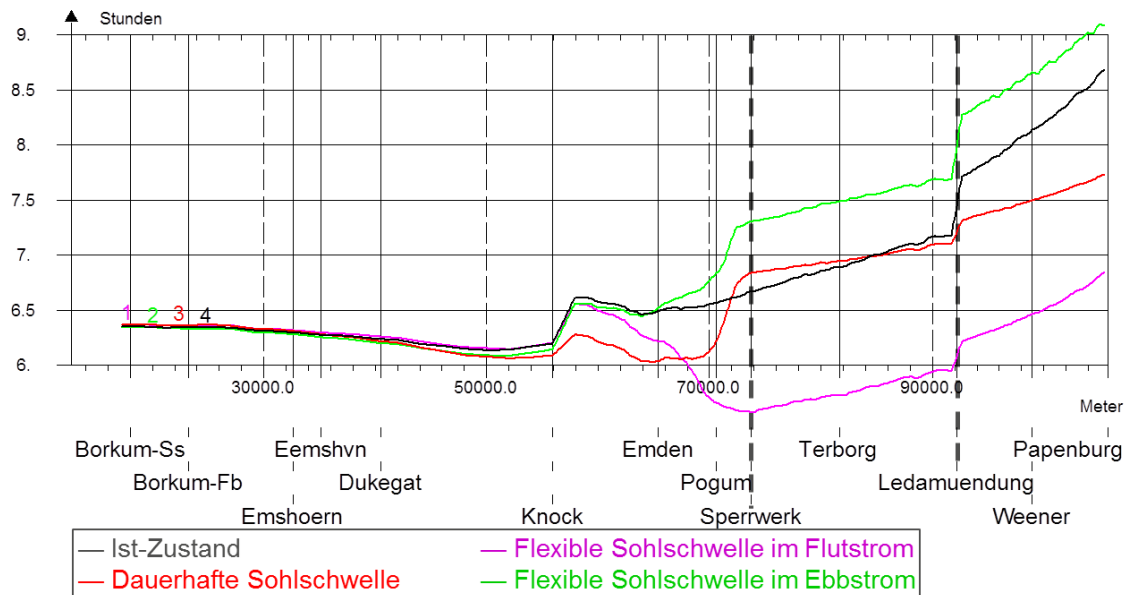


Bild 42: Mittlere Ebbestromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Die Veränderungen der mittleren Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten lassen sich somit einerseits mittels der Abnahme des Flut- und Ebbestromvolumens erklären, andererseits mittels der Zu- oder Abnahme der Flut- und Ebbestromdauer: Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom wird die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten reduzieren (Bild 43), weil das Flutstromvolumen abnimmt und die Flutstromdauer zunimmt. Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten könnten abnehmen, weil das Ebbestromvolumen abnimmt, oder zunehmen, weil die Ebbestromdauer abnimmt. Hier nehmen die Ebbestromgeschwindigkeiten seewärts vom Emssperrwerk ab (der Einfluss der Abnahme des Ebbestromvolumens überwiegt) und stromauf vom Emssperrwerk zu (der Einfluss der Abnahme der Ebbestromdauer überwiegt). Siehe Bild 44.

Entsprechendes gilt umgekehrt für die flexible Sohlschwelle im Ebbstrom: Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten werden sich reduzieren (Bild 44), weil das Ebbestromvolumen abnimmt und die Ebbestromdauer zunimmt. Die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten könnten abnehmen, weil das Flutstromvolumen abnimmt, oder zunehmen, weil die Flutstromdauer abnimmt. Hier nehmen die Flutstromgeschwindigkeiten ab (der Einfluss der Abnahme des Flutstromvolumens überwiegt). Siehe Bild 43.

Mittlere Flutstromgeschwindigkeit

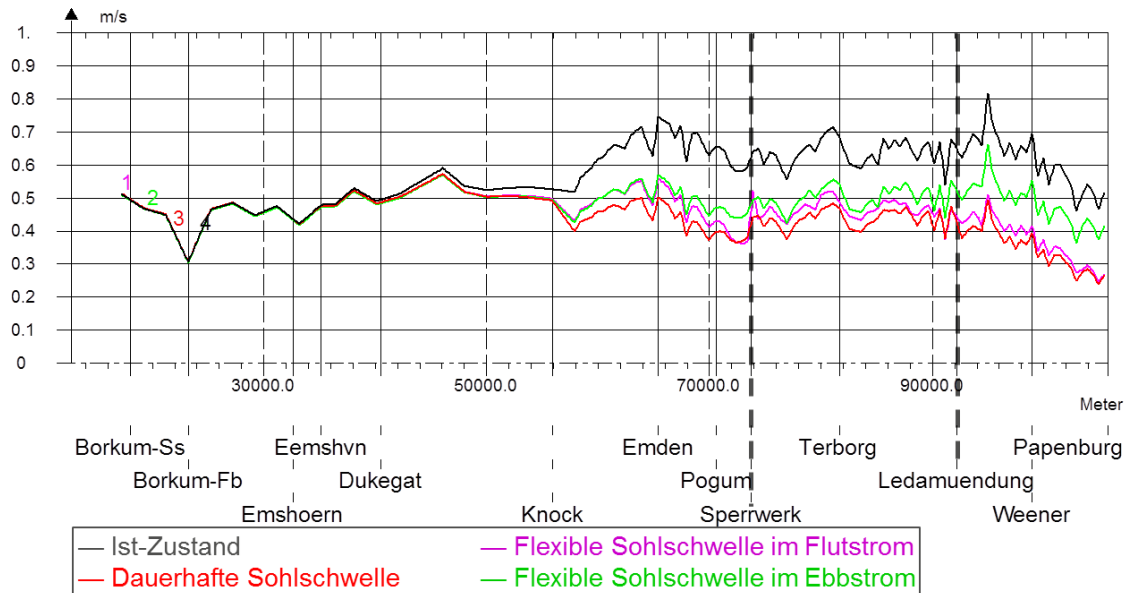


Bild 43: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit

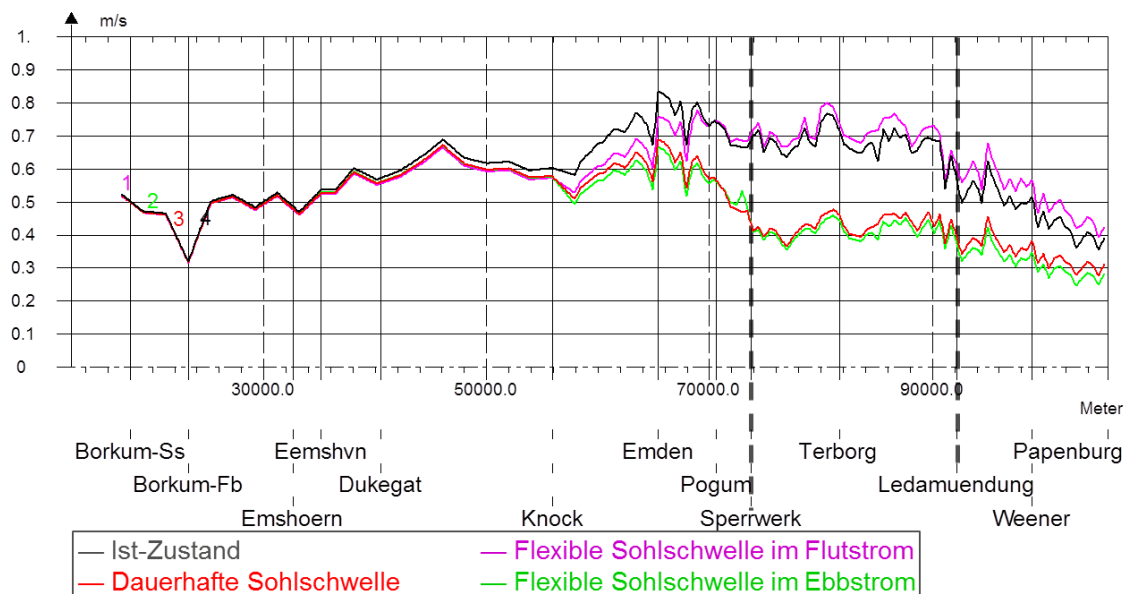


Bild 44: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Das Verhältnis der mittleren Flut- zu mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten verändert sich im Vergleich zum Ist-Zustand bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ab Emder Fahrwasser zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 45). Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten sind an allen Orten der Unterems bis Papenburg größer als die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten. Das Verhältnis der Flutstrom- zu Ebbestromgeschwindigkeiten ist dann etwa zwischen 0,5 und 0,8. Das entspricht 25 % bis 50 % höhere mittlere Ebbestrom- als Flutstromgeschwindigkeiten.

Bei der flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom verändert sich das Verhältnis im Vergleich zum Ist-Zustand ab Emssperrwerk zu Gunsten des Flutstroms. Die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten sind ab Emssperrwerk bis Papenburg größer als die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten. Das Verhältnis der Flutstrom- zu Ebbestromgeschwindigkeiten ist dann zwischen Emssperrwerk und Ledamündung etwa 1,2 (entsprechend 20 % höhere mittlere Flutstrom- als Ebbestromgeschwindigkeiten) und etwa 1,5 bis 1,6 zwischen Ledamündung und Papenburg (entsprechend 50 % bis 60 % höhere mittlere Flutstrom- als Ebbestromgeschwindigkeiten).

Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten

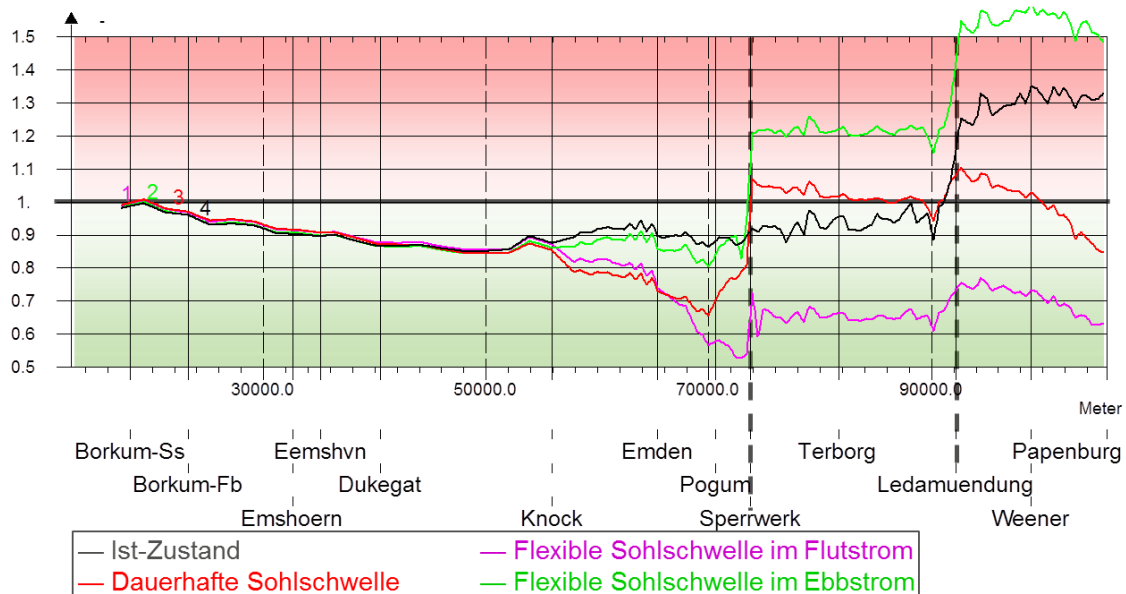


Bild 45: Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit.

Es gibt aber auch einen Abschnitt um das Emssperrwerk herum, wo die Strömungsgeschwindigkeiten durch eine flexible Sohlschwelle sowohl im Flut- als auch im Ebbestrom deutlich zunehmen werden. Dies gilt für alle offenen Tore des Emssperrwerks während der Querschnittseinengung und den Bereich aus Strömungssicht hinter den offenen Toren des Emssperrwerks (Bild 46).

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ist der hydraulisch wirksame Querschnitt am Emssperrwerk nur im Flutstrom deutlich reduziert, der Flutstrom kann das Sperrwerk nur durch die Hauptschiffahrtsöffnung passieren. Während des Flutstroms stellt sich deshalb ein hoher Wasserspiegelgradient ein, der Wasserstand steigt im Unterwasser schneller an als im Oberwasser. Die Folge ist, dass das Wasservolumen während des Passierens des Emssperrwerks eine hohe Beschleunigung erfährt. Es bildet sich eine Strömungsfahne mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten nach stromauf, beginnend in der Hauptschiffahrtsöffnung.

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom ist der hydraulisch wirksame Querschnitt am Emssperrwerk nur im Ebbestrom deutlich reduziert, der Ebbestrom kann das Sperrwerk nur durch die Hauptschiffahrtsöffnung passieren. Während des Ebbestroms stellt sich deshalb ein hoher Wasserspiegelgradient ein, der Wasserstand steigt im Oberwasser schneller an als im Unterwasser. Die Folge ist, dass das Wasservolumen während des Passierens des Emssperrwerks eine hohe Beschleunigung erfährt. Es bildet sich eine Strömungsfahne mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten nach stromab, beginnend in der Hauptschiffahrtsöffnung.

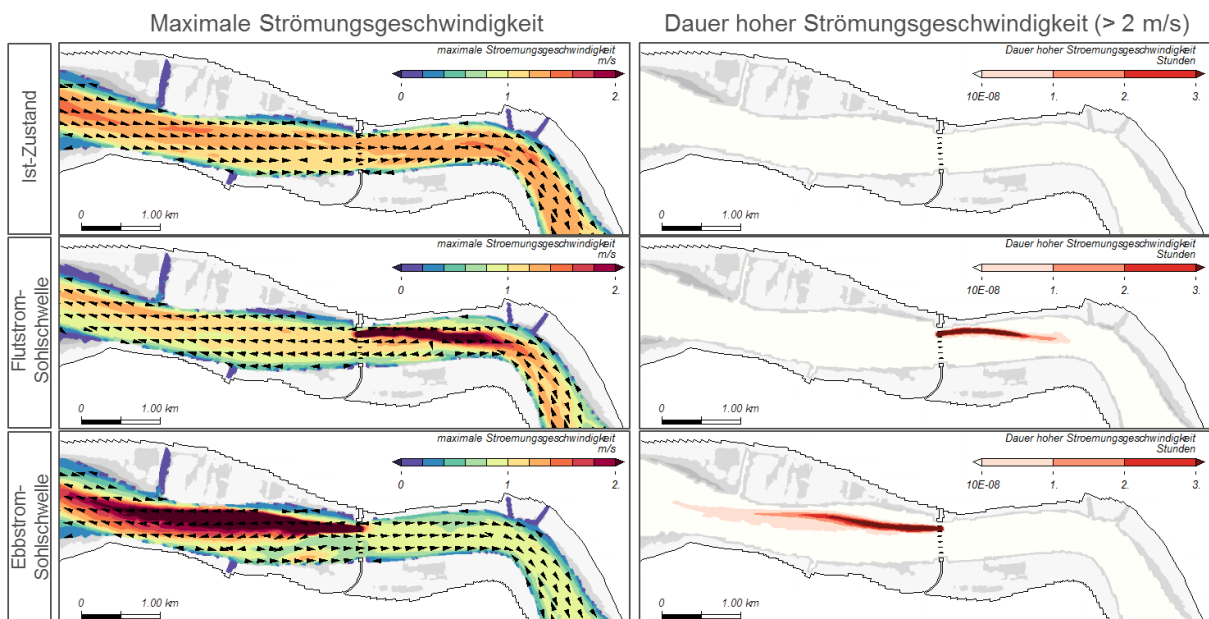


Bild 46: Maximale Strömungsgeschwindigkeit (linke Seite) und die Dauer hoher Strömungsgeschwindigkeiten größer als 2 m/s (rechte Seite) während der Tide am 16.5.2010 zwischen 02:30 und 16:00 Uhr für den Ist-Zustand (Oben) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Mitte) und im Ebbestrom (Unten).

5.2.1.2 Wirkung auf die Salzintrusion

Beide Varianten der flexiblen Sohlschwelle werden wie die dauerhafte Sohlschwelle zu einer verminderten Salzintrusion in das Ems-Ästuar führen (Bild 47). Dafür sind zwei Gründe zu nennen:

1. Eine veränderte barokline Zirkulation, weil sich das Tidemittelwasser als Indikator für den mittleren barotropen Druckgradienten ändert und
2. eine Veränderung der Transportweglängen, weil sich die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und die Flut- und Ebbestromdauern verändern.

Maximaler Salzgehalt

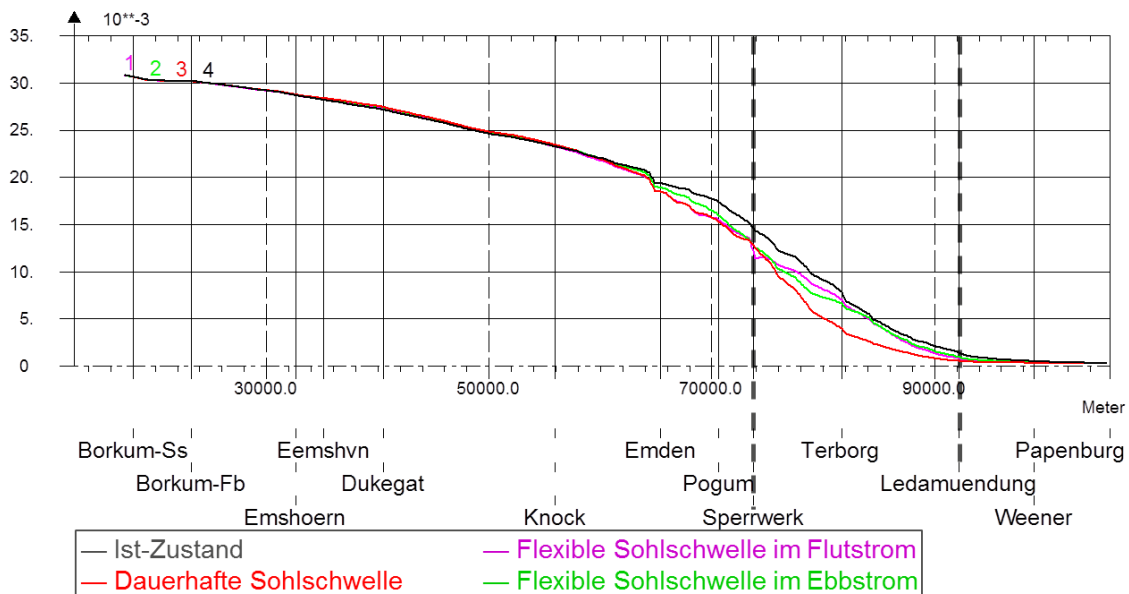


Bild 47: Maximaler Salzgehalt (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom nimmt das Tidemittelwasser ab (Bild 48), weil das Tidehochwasser absinkt. Das Tidemittelwasser ist ein Indikator für den mittleren barotropen Druckgradienten. Je steiler das Tidemittelwasser nach oberstrom hin ansteigt, desto stärker wirkt der barotrope Druckgradient der baroklinen Zirkulation entgegen. Dazu zwei Anmerkungen zur flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom:

- Durch die sprunghafte Absenkung des Tidemittelwassers am Emssperrwerk wird die barokline Zirkulation zwischen der Außenems und der Unterems verstärkt, die Salzintrusion von der Außenems in die Unterems nimmt zu.
- Stromauf vom Emssperrwerk verdoppelt sich die Steigung des Tidemittelwassers im Vergleich zum Ist-Zustand. Der mittlere barotrope Druckgradient wird in der Unterems oberhalb des Emssperrwerks größer. Salz, das schon in der Unterems ist, kann mit

Hilfe der baroklinen Zirkulation nicht mehr so weit nach stromauf transportiert werden, als im Ist-Zustand.

Bei einer flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom zeigt sich das ein entgegengesetztes Bild: Das Tidemittelwasser nimmt am Emssperrwerk sprunghaft zu (Bild 48), weil das Tideniedrigwasser angehoben wird, dafür sinkt die Steigung des Tidemittelwassers in der Unterems:

- Durch die sprunghafte Anhebung des Tidemittelwassers am Emssperrwerk wird die barokline Zirkulation zwischen der Außenems und der Unterems abgeschwächt, die Salzintrusion von der Außenems in die Unterems nimmt ab.
- Stromauf vom Emssperrwerk ist die Steigung des Tidemittelwassers nahezu Null (8 % der Steigung im Vergleich zum Ist-Zustand), der mittlere barotrope Druckgradient wird auf weniger als ein Zehntel im Vergleich zum Ist-Zustand reduziert. Salz, das schon in der Unterems ist, kann mit Hilfe der baroklinen Zirkulation weiter nach stromauf transportiert werden, als im Ist-Zustand.

Mittleres Tidemittelwasser

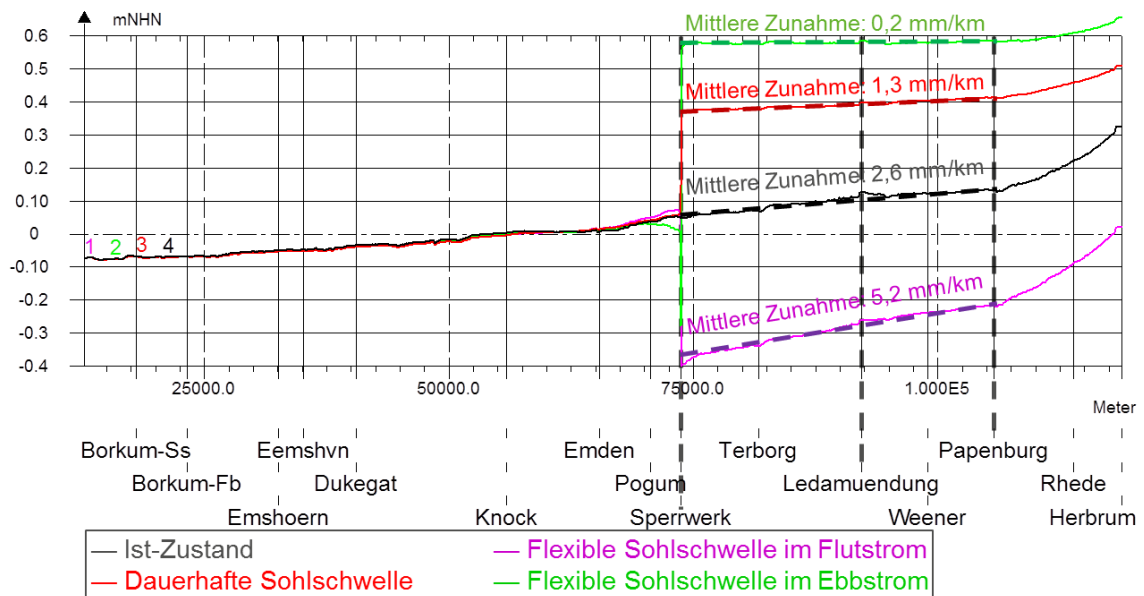
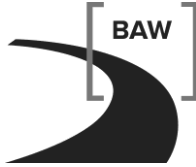


Bild 48: Mittleres Tidemittelwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün). Für den Abschnitt Ems-Kilometer 30 (stromauf Emssperrwerk) bis Ems-Kilometer 0 (Papenburg) ist eine lineare Regression durchgeführt worden: Die Steigungen dieser Geraden sind angegeben.

Zweitens führen beide Varianten der flexiblen Sohlschwelle zu einer Änderung der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (zumeist Abnahmen mit Ausnahme der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten stromauf vom Emssperrwerk bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom) und zu einer Veränderung der Flut- und Ebbestromdauern. Beides zusammen führt



zu kürzeren advektiven Transportwegen des Salzes mit dem Flut- und dem Ebbstrom (Bild 49 und Bild 50).

Mittlerer Flutstromweg

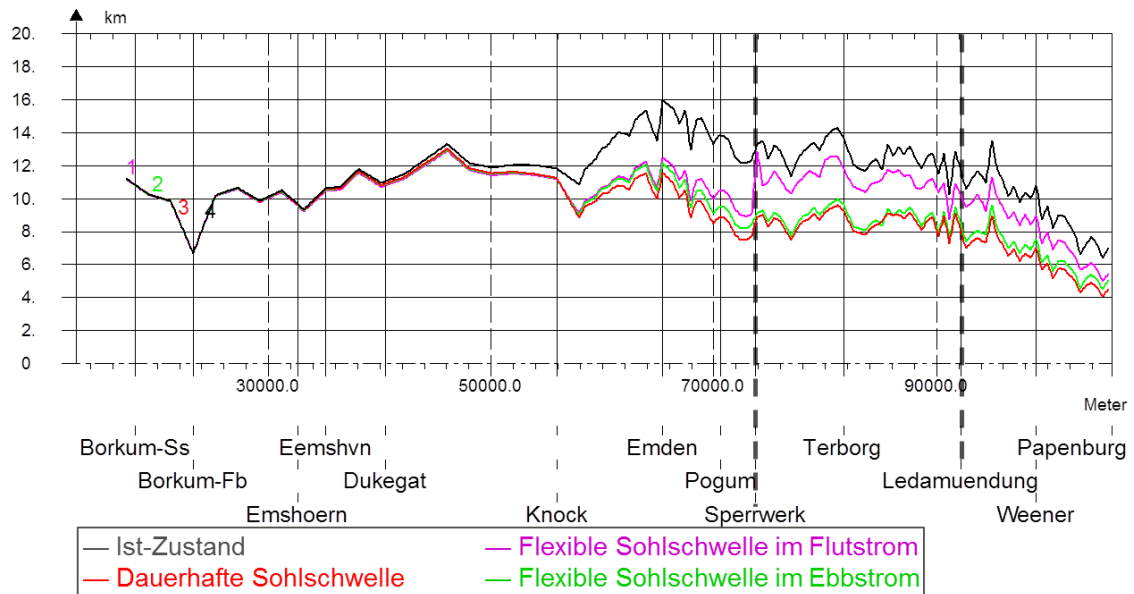


Bild 49: Mittlerer (eulerscher) Flutstromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Der Flutstromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und der Flutstromdauer.

Mittlerer Ebbestromweg

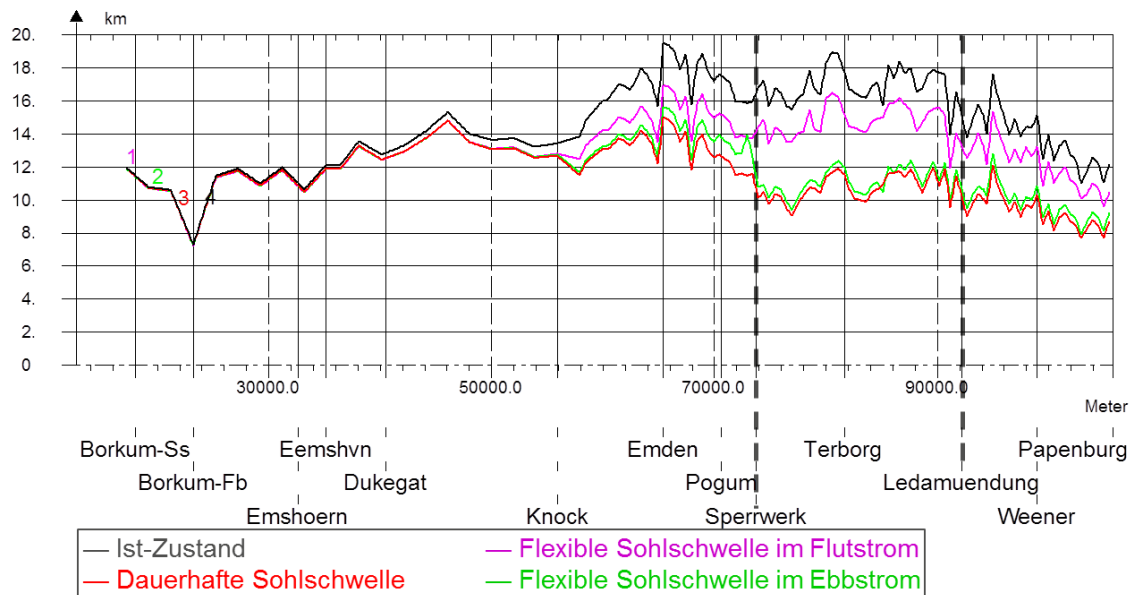


Bild 50: Mittlerer (eulerscher) Ebbestromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Der Ebbestromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit und der Ebbestromdauer.

Entscheidend ist die Veränderung der Transportwege mit dem Flutstrom im Verhältnis zu den Transportwegen mit dem Ebbestrom (Bild 51). Seewärts Knock ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Flutstromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt für beide Varianten der flexiblen Sohlschwelle zu, aber in geringerem Maße als bei der dauerhaften Sohlschwelle. Zwischen Knock und dem Emssperrwerk ändert sich das Verhältnis zu Gunsten des Ebbestromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt ab. Zwischen Emssperrwerk und der Ledamündung ändert sich bei der flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom das Verhältnis zu Gunsten des Flutstromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt mit der flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom zu. Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom ändert in diesem Abschnitt das Verhältnis im Vergleich zum Ist-Zustand kaum. Stromauf von der Ledamündung ändert sich mit der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom das Verhältnis zu Gunsten des Ebbestromweges. Die Salzintrusion nimmt in diesem Abschnitt mit der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ab. Die flexible Sohlschwelle im Ebbestrom ändert in diesem Abschnitt das Verhältnis im Vergleich zum Ist-Zustand kaum.

Verhältnis Flutstromweg zu Ebbestromweg (Mit.)

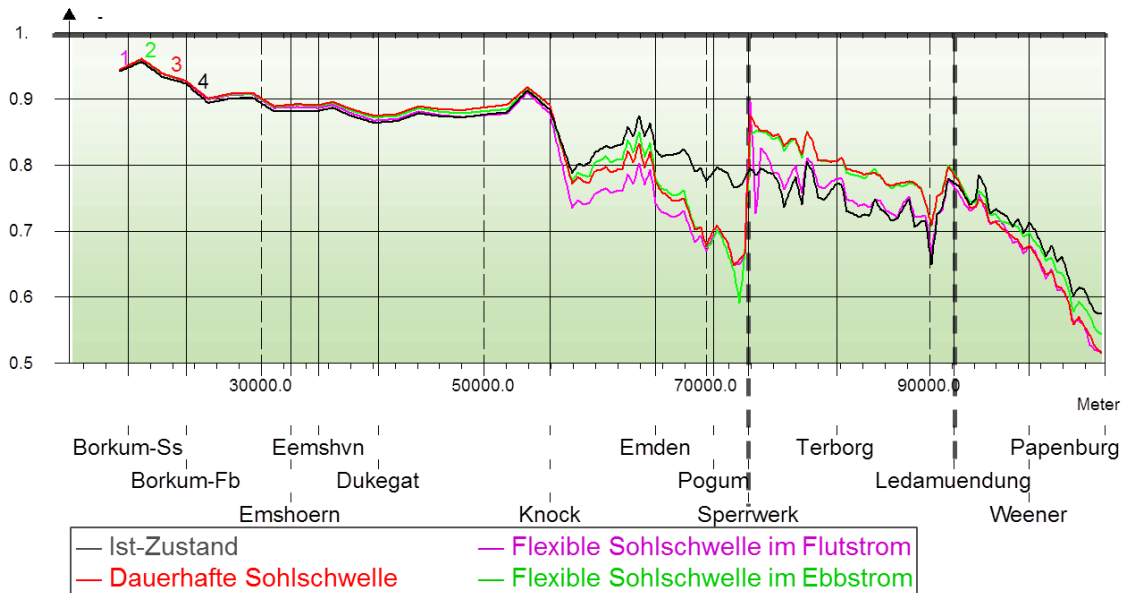


Bild 51: Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromwege im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Werte kleiner 1 (grüner Hintergrund) zeigen an, dass die Ebbestromwege größer sind als die Flutstromwege.

Letztlich ist die veränderte Salzintrusion das Ergebnis beider Prozesse. Für das hier gewählte Szenario nimmt der maximale Salzgehalt durch die beiden Varianten der flexiblen Sohlschwelle in der Unterems ab. Die Abnahme fällt in beiden Varianten der flexiblen Sohlschwelle geringer aus im Vergleich zur dauerhaften Sohlschwelle.

5.2.1.3 Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt

Der Schwebstoffgehalt wird in der Unterems stromauf vom Emssperrwerk abnehmen (Bild 52 und Bild 53), weil die Flutstromgeschwindigkeiten abnehmen, sich dadurch die Bodenschubspannungen reduzieren und der Erosionsfluss von Sedimenten vom Boden in den Wasserkörper abnimmt. Dies gilt für die Ebbestromgeschwindigkeiten nur für die flexible Sohlschwelle im Ebbstrom, im Fall der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom sind die mittleren (Bild 44) und die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten (Bild 55) auf dem Niveau des Ist-Zustands und auch darüber. Der hellgrau hinterlegte Kasten in Bild 53 zeigt, dass der mittlere Schwebstoffgehalt auch in der Außenems seewärts von Knock abnimmt.

Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom führt zwischen Knock und dem Emssperrwerk zu einer Zunahme des Schwebstoffgehalts. Ursache ist eine veränderte Lage des seeseitigen Beginns des Trübungsmaximums. Der seeseitige Beginn der Zone hohen Schwebstoffgehalts variiert mit der Tide, er wird im Flutstrom stromauf und im Ebbestrom stromab verschoben. Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom führt zu geringeren Flutstromgeschwindigkeiten (Bild

43) und kürzeren Flutstromwegen (Bild 49) als im Ist-Zustand und so verschiebt sich der seeseitige Beginn des Trübungsmaximums zur Flutstromkenterung weniger weit nach stromauf als im Ist-Zustand. Im Ebbestrom sind die Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Knock und Pogum geringer als im Flutstrom (Bild 44). Daraus folgt, dass zur Ebbestromkenterung die seeseitige Grenze ebenfalls weiter nach stromab verschoben ist, als im Ist-Zustand. Somit ist die Trübungszone durch die flexible Sohlschwelle im Flutstrom wenige Kilometer Richtung Nordsee verschoben.

Zusätzlich zeigt sich in diesem Abschnitt bereits die Wirkung der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom auf den residuellen Schwebstoff-Transport: Der Schwebstofftransport ist bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom in der Unterems und im Emden Fahrwasser mit dem Ebbestrom größer als mit dem Flutstrom. Es werden mehr Schwebstoffe mit dem Ebbestrom in Richtung Knock aus der Unterems heraus transportiert, als der Flutstrom in die Unterems transportiert. Die Schwebstoffe werden in Richtung Außenems verlagert, die Trübungszone wandert nach stromab.

Beide genannten Prozesse sind das kurzfristige Resultat der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom. Wenn nach längerer Wirkdauer der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom der Transport von Schwebstoffen aus der Unterems nachlässt, wird sich auch zwischen Knock und dem Emssperrwerk ein niedrigerer Schwebstoffgehalt einstellen, als in dieser Variante vom HN-Modell prognostiziert.

Maximaler Schwebstoffgehalt (Schluff)

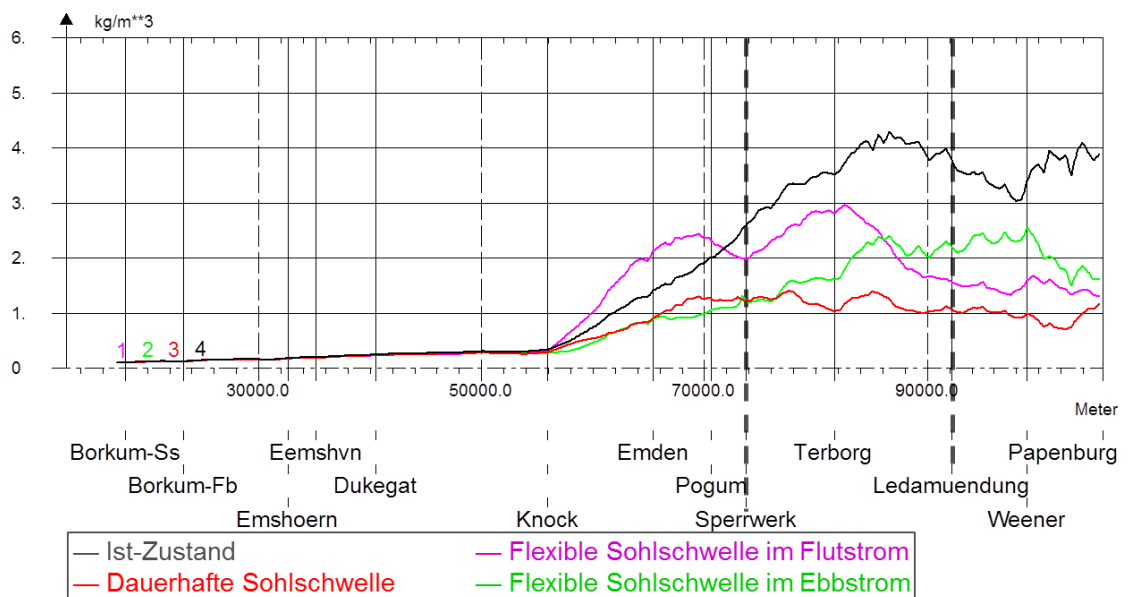


Bild 52: Maximaler Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Mittlerer Schwebstoffgehalt (Schluff)

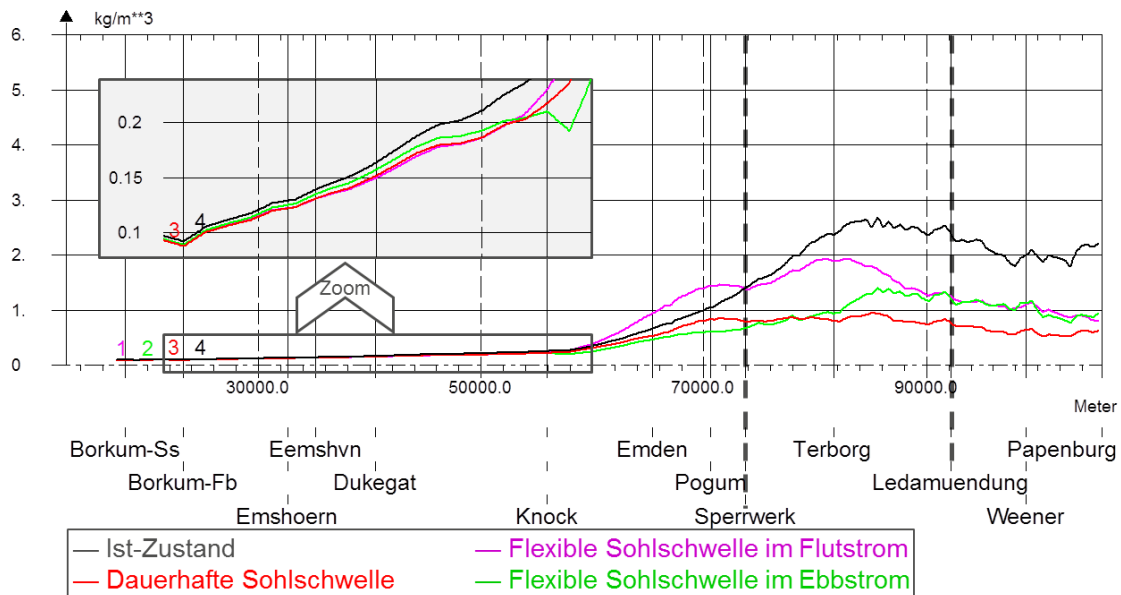


Bild 53: Mittlerer Schwebstoffgehalt der Schluff-Fraktion (Mittelwert im Analysezeitraum) im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Für den hellgrau hinterlegten Kasten links oben ist der Wertebereich für den Schwebstoffgehalt verändert worden, um die Unterschiede in der Außenems hervorzuheben.

Die Bodenschubspannung ist proportional vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. D.h., dass hohe Strömungsgeschwindigkeiten einen überproportionalen Einfluss auf die Bodenschubspannung und damit auf den Erosionsfluss haben. Deshalb sollen hier auch die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten dargestellt werden (Bild 54 und Bild 55). Qualitativ ändern sich die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten wie die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten. Generell werden die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten abnehmen, mit Ausnahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

Maximale Flutstromgeschwindigkeit (Mit)

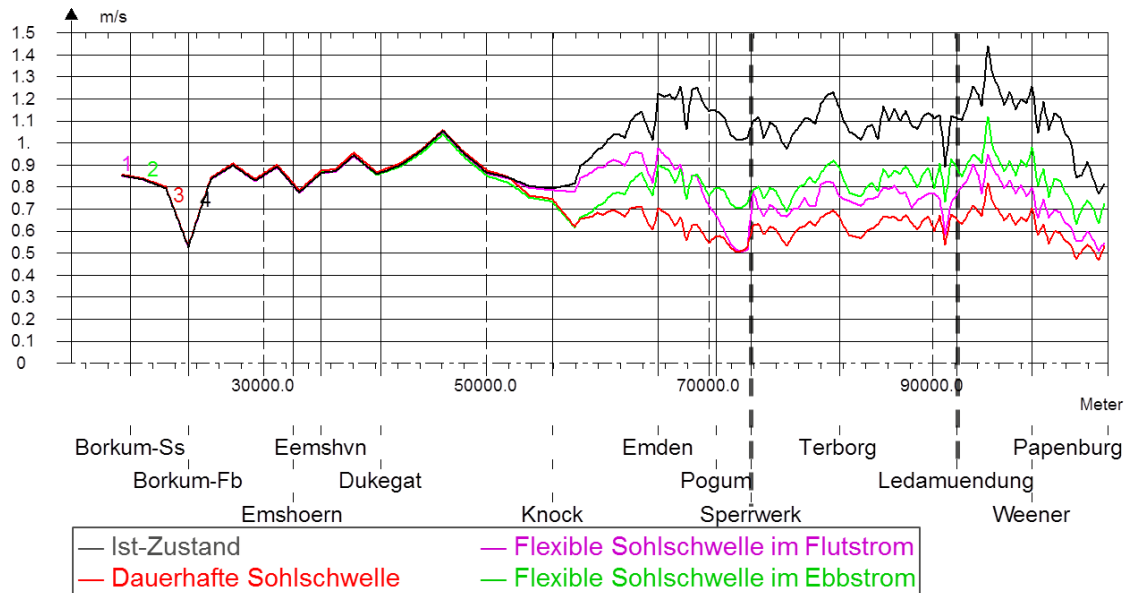


Bild 54: Maximale Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Maximale Ebbstromgeschwindigkeit (Mit)

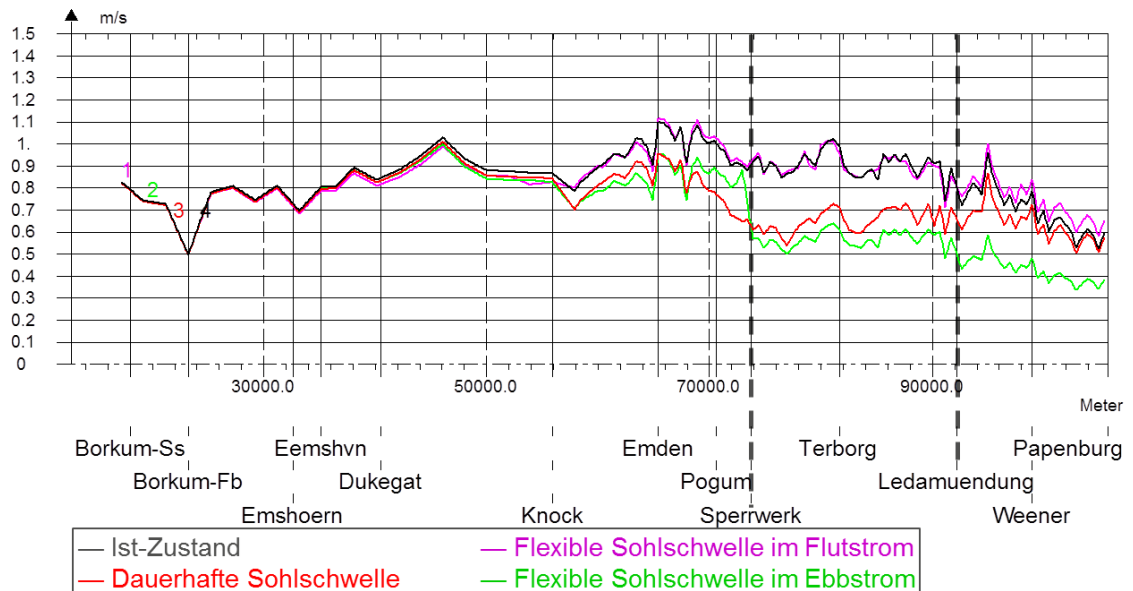


Bild 55: Maximale Ebbstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Mittelung).

Das Verhältnis der maximalen Flut- zu maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten verändert sich durch die flexible Sohlschwelle im Flutstrom stromauf von Knock zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeit. Die flexible Sohlschwelle im Ebbestrom führt dagegen stromauf vom Emssperrwerk zu einer Änderung zu Gunsten der Flutstromgeschwindigkeit, die Tideasymmetrie wird verschärft.

Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten

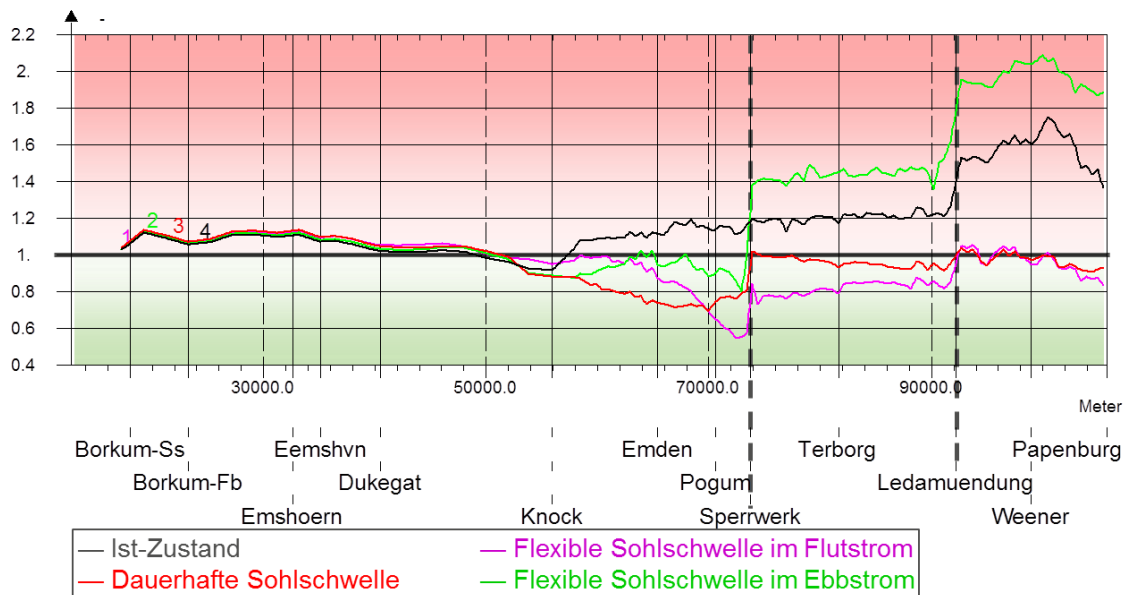


Bild 56: Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit.

Der Transport von Schwebstoffen nimmt sowohl im Flutstrom (Bild 57) als auch im Ebbestrom (Bild 58) im Ems-Ästuar ab, weil einerseits das Flut- und Ebbestromvolumen und andererseits der Schwebstoffgehalt abnimmt.

Einzigste Ausnahme ist der Bereich Knock bis zum Emssperrwerk bei der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom. Hier sorgt die oben angesprochene Verlagerung der Trübungszone von der Unterems in Richtung Außenems dazu, dass sowohl der Transport von Schwebstoffen im Flutstrom als auch im Ebbestrom zunimmt, weil der Schwebstoffgehalt in diesem Bereich stärker zunimmt, als Flut- und Ebbestromvolumen abnehmen.

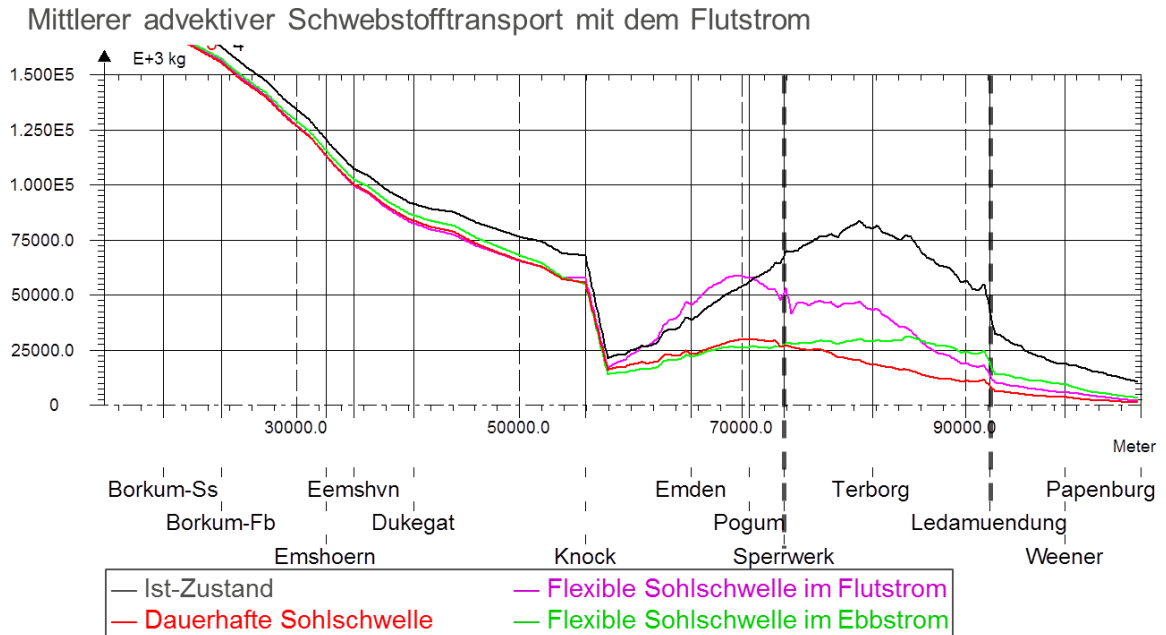


Bild 57: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Integration).

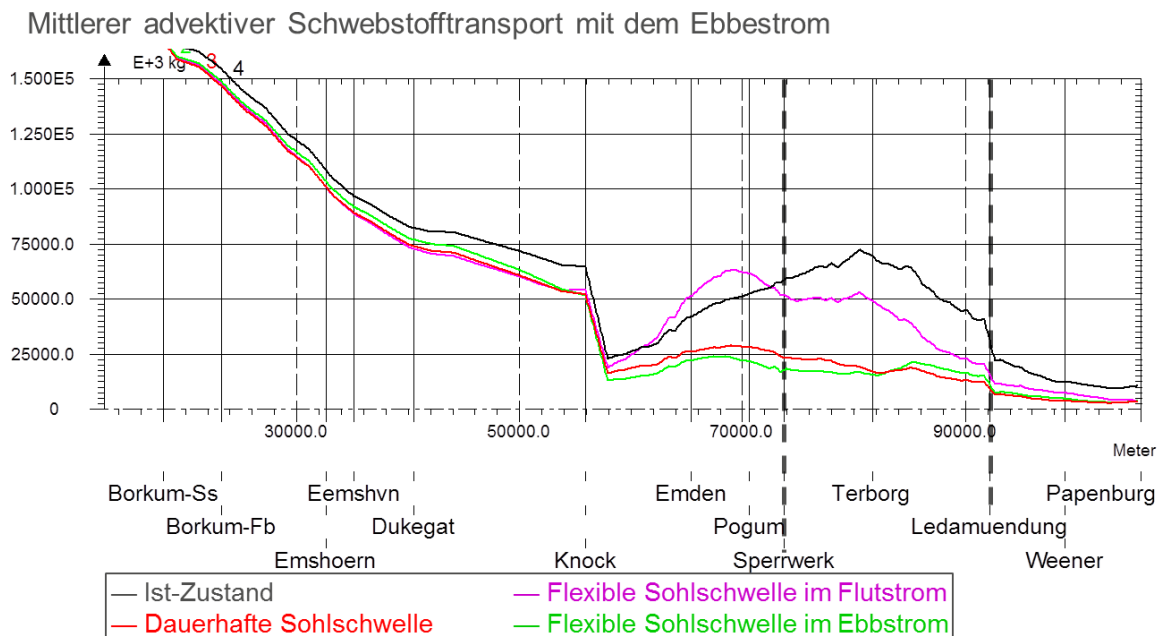
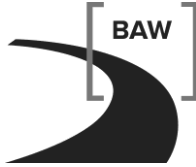


Bild 58: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbestrom (Grün) (Querprofil-Integration).



Die Differenz des Schwebstofftransports (Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom minus Schwebstofftransport mit dem Flutstrom) ist der residuelle Schwebstoff-Transport. Er zeigt im Ist-Zustand an, dass sowohl in der Außenems als auch in der Unterems der Flutstrom mehr Schwebstoffe nach stromauf transportiert, als der Ebbestrom zurück in Richtung Nordsee (Bild 59).

Durch die flexible Sohlschwelle im Flutstrom wird von der Knock bis Papenburg der residuelle Schwebstoff-Transport in einen ebbstrom-dominanten Schwebstoff-Transport umgekehrt. Die Ursache ist die Verlängerung der Flutstromdauer durch die Querschnitts-Einengung und damit die Verkürzung der Ebbestromdauer. Damit und durch die Reduzierung des Flutstromvolumens werden die Flutstromgeschwindigkeiten abnehmen. Die Ebbestromgeschwindigkeiten werden sich im Vergleich zum Ist-Zustand kaum ändern, weil sich die Ebbestromvolumen-Reduzierung und die Verkürzung der Ebbestromdauer in ihrer Wirkung auf die Ebbestromgeschwindigkeiten annähernd die Waage halten.

Bei der flexiblen Sohlschwelle im Ebbestrom ändert sich der residuelle Schwebstoff-Transport im Vergleich zum Ist-Zustand nur wenig. Seewärts ändert sich der residuelle Transport zu Gunsten des Flutstroms, stromauf von Terborg zu Gunsten des Ebbestroms.

In der Außenems ändert sich der residuelle Schwebstoff-Transport nur wenig. Es bleibt beim flutstrom-dominanten Schwebstoff-Transport, der tendenziell verstärkt wird.

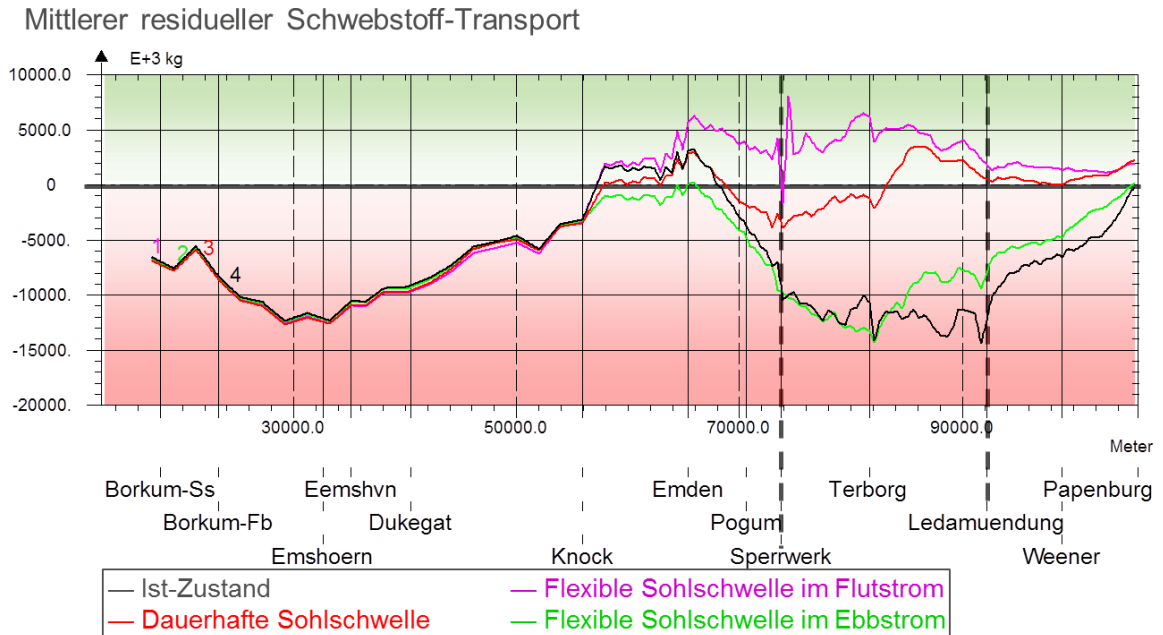


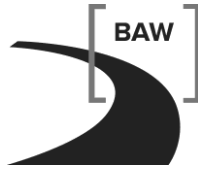
Bild 59: Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz), die dauerhafte Sohlschwelle (Rot) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom (Magenta) und im Ebbstrom (Grün) (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen 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.

5.2.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Leistungsfähigkeit wird durch den eingengten Querschnitt einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom reduziert, wodurch sich der Flutstromkenterpunkt im Vergleich zum Ist-Zustand verspätet. Der Ebbestromkenterpunkt verändert sich im Vergleich zum Ist-Zustand nicht, weil im Ebbestrom der Querschnitt nicht eingengt ist. Daraus folgt, dass die Flutstromdauer verlängert wird und sich die Ebbestromdauer verkürzt. Dies führt zu einer veränderten Tide-Asymmetrie, die bezüglich der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und bezüglich des Schwebstofftransports zu einer deutlichen Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand führt.

Die flexible Sohlschwelle im Ebbstrom verlängert die Ebbestrom- und verkürzt die Flutstromdauer. Dies führt zu einer veränderten Tide-Asymmetrie, die bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten und bezüglich des Schwebstofftransports zu einer deutlichen Verschlechterung im Vergleich zum Ist-Zustand führt.

Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom führt auch zu einer Verbesserung des residuellen Schwebstofftransports im Vergleich zur dauerhaften Sohlschwelle, weil sich nur der Flutstromkenterpunkt verspätet und dies zu einer größeren Zunahme der Flutstromdauer im



Vergleich zur dauerhaften Sohlschwelle führt. Sie ist also grundsätzlich einer dauerhaften Sohlschwelle vorzuziehen. Sie weist auch gegenüber der dauerhaften Sohlschwelle eine höhere Durchlässigkeit u.a. für die Schifffahrt auf, weil die Querschnittseinengung am Emssperrwerk nicht dauerhaft, sondern nur während des Flutstroms erfolgt.

Nachteilig ist, dass sich in der Nähe des Emssperrwerks hohe Strömungsgeschwindigkeiten einstellen werden. Sie könnten so hoch sein, dass die Standsicherheit des Emssperrwerks im Sohlschwellenbetrieb zu klären ist.

5.2.2 Variation der aktiven Dauer einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom

Allen hier untersuchten Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ist die Torstellung im aktiven Zustand der Sohlschwelle gemeinsam und sie entspricht der Torstellung aus dem vorherigen Kapitel 5.2.1 (siehe Bild 31).

Bei diesen Varianten werden die Sperrwerkstore immer zu Beginn des Flutstroms in den aktiven Zustand der Sohlschwelle gebracht. Die Varianten unterscheiden sich in der Dauer, die die flexible Sohlschwelle aktiv ist. Insgesamt sind 5 Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom untersucht worden. Die Dauer, die die Sohlschwelle aktiv ist und so den Querschnitt einengt, variiert von 2h bis 6h Stunden. Der Ebbstrom kann in allen Varianten ungehindert das Emssperrwerk passieren.

Ziel dieses Vergleichs ist es aufzuzeigen, ob eine verkürzte Querschnittseinengung im Flutstrom auch (näherungsweise linear) zu einer Abnahme der gewünschten Änderung des residuellen Schwebstofftransports führt, ob sich also mit verkürzter Dauer, die die Sohlschwelle aktiv ist, die Ergebnisse wieder dem Ist-Zustand annähern.

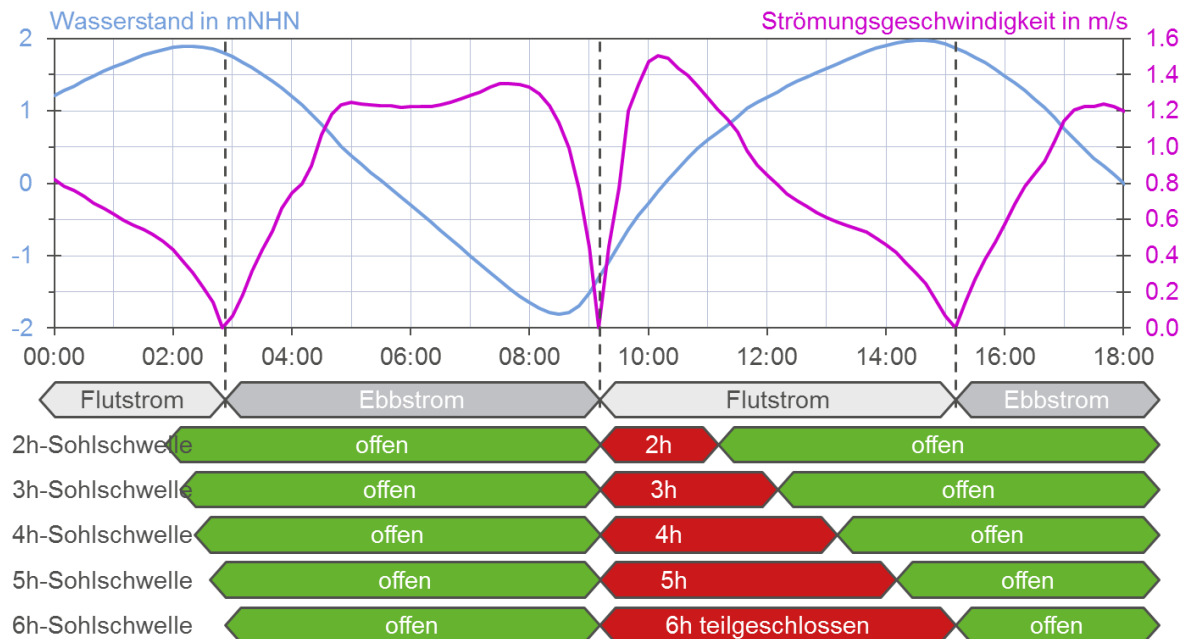


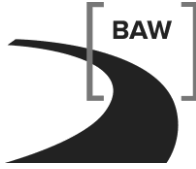
Bild 60: Skizze des zeitlichen Verlaufs der Querschnittseinengung für die verschiedenen Varianten einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (unten). Oben in Blau eine Wasserstandsganglinie und in Rot eine Strömungsganglinie am Emssperrwerk für den Ist-Zustand. Während die Sohlschwelle aktiv ist können sich die Ganglinien am Emssperrwerk erheblich ändern.

Weil es bei allen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom während des aktiven Zustands zu einer hohen Wasserstands-differenz zwischen dem Unter- und Oberwasser am Emssperrwerk kommt, wird der Öffnungsvorgang der Sperrwerkstore zum Ende der Querschnittseinengung (also der Wechsel vom aktiven Zustand zum offenen Zustand) nicht wie der Schließvorgang in 20 Minuten durchgeführt, sondern der Öffnungsvorgang braucht 1 Stunde. Mit diesem langsamen Öffnen soll eine Schwall- und Sunkwelle durch den Öffnungsvorgang minimiert werden.

5.2.2.1 Wirkung auf die Hydrodynamik

Die Querschnittseinengung am Emssperrwerk führt bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom zu einer Reduzierung des Tidestromvolumens. Abhängig von der Dauer, die die flexible Sohlschwelle aktiv ist, variiert das Ausmaß der Volumenreduzierung. Das Ebbestrom- und das Flutstromvolumen der 2h- und der 3h-Sohlschwelle sind in der Unterems der des Ist-Zustandes sehr ähnlich. Bei der 4h-Sohlschwelle ist in Bild 61 und Bild 62 hingegen eine Reduzierung des Volumens erkennbar. Die 5h- und 6h-Sohlschwelle weisen aufgrund der längsten Dauer der Querschnittseinengung die größte Abnahme des Volumens auf.

Diese Tidestromvolumenreduzierung spiegelt sich in einer Absenkung des Tidehochwassers vor allem stromauf des Emssperrwerks wieder, da der Querschnitt während des Flutstroms eingengt wird. Das Tideniedrigwasser wird durch die verschiedenen Varianten der flexiblen



Sohlschwelle im Flutstrom nur gering beeinflusst (Bild 63 und Bild 64). Die Absenkung des Tidehochwassers fällt prinzipiell desto größer aus, je länger die flexible Sohlschwelle aktiv ist. So ist die größte Absenkung von ca. 0,5 m stromauf des Emssperrwerks bei der 6h-Sohlschwelle zu beobachten. Die Absenkung des Tidehochwassers der 2h-Sohlschwelle fällt hier jedoch zunächst geringer aus als die der 3h-Sohlschwelle.

Eine Reflektion der Schwallwelle am Wehr in Herbrum kann wiederum abhängig von der Sohlschwellenvariante und vom Ort zu einer Anhebung des Tidehochwassers führen, was das im Vergleich zum Ist-Zustand erhöhte mittlere Tidehochwasser der 2h- und 3h-Sohlschwelle stromauf der Ledamündung und der 4h-Sohlschwelle stromauf von Papenburg erklären kann. Sunk- und Schwallwellen können durch das Öffnen der Sperrwerkstore hervorgerufen werden. In Bild 66 sind Sunkwellen stromab des Emssperrwerks deutlich bei der 2h-, 3h- und 4h-Sohlschwelle erkennbar. Stromauf des Sperrwerkes weist die Wasserstandskurve der verschiedenen Varianten der flexiblen Sohlschwelle bis zum Öffnen der Sperrwerkstore eine geringere Steigung auf als die Kurve des Ist-Zustands. Nach Öffnung des Sperrwerks bewirkt eine Schwallwelle eine Annäherung des Wasserstandes an den Ist-Zustand und so eine im Vergleich zum Ist-Zustand größere Steigung (Bild 67). In Bild 68 ist der Wasserstand und dessen Steigung der 2h-Sohlschwelle an drei verschiedenen Orten (Ems-km 0, 5 und 10) dargestellt. Auffällig sind drei Steigungspeaks, wobei der erste Peak den Beginn des Flutstroms und der zweite das Öffnen des Sperrwerks darstellt. Diese beiden Peaks treten zuerst am Ems-km 10 auf und bewegen sich dann mit der Strömung stromauf. Der dritte Steigungspeak hingegen läuft entgegengesetzt zur Strömung stromab. Ein Vergleich der Ankunftszeit des 2. Peaks (Schwallwelle) und des 3. Peaks bestätigen, dass der 3. Steigungspeak durch eine Reflektion am Wehr in Herbrum hervorgerufen wird (Bild 68).

Aufgrund der geringen Veränderungen des Tideniedrigwassers werden Änderungen des Tidehubs vorwiegend vom Tidehochwasser verursacht. So ist beim Tidehub neben der Abnahme stromab des Emssperrwerks auch der Einfluss der reflektierten Schwallwelle erkennbar und somit eine teilweise Vergrößerung des Tidehubs bei der 2h- bis 4h-Sohlschwelle erkennbar (Bild 65).

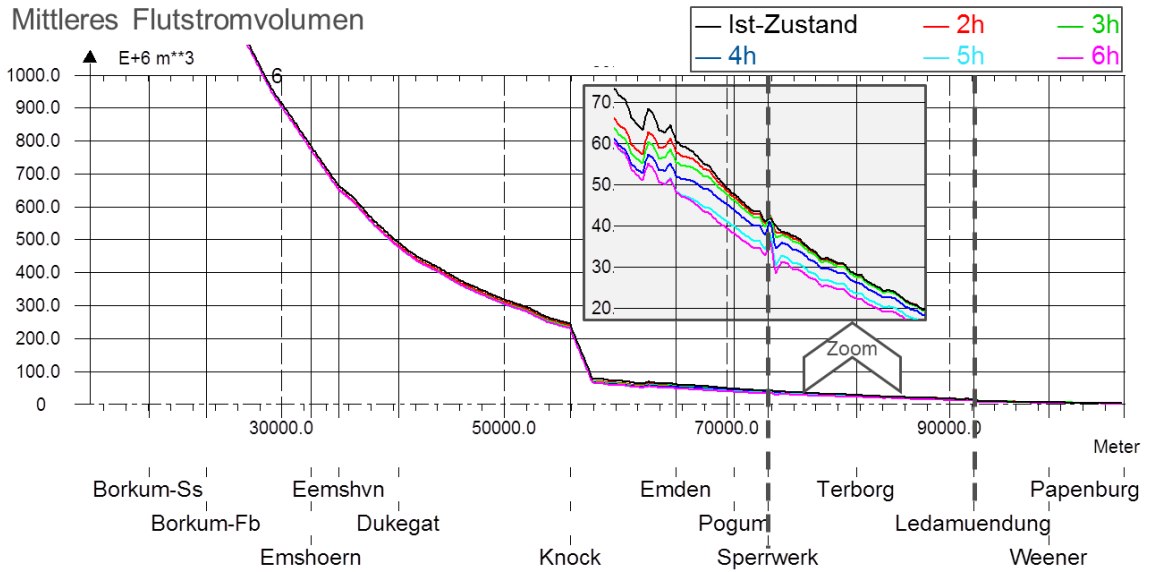


Bild 61: Mittleres Flutstromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Integration).

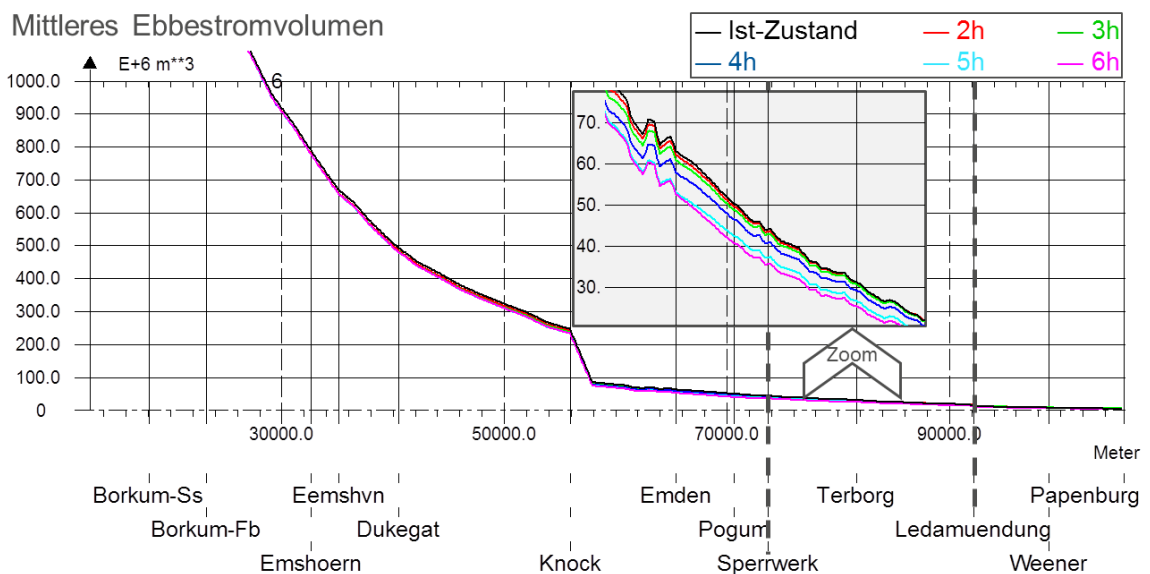


Bild 62: Mittleres Ebbestromvolumen im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Integration).

Mittleres Tidehochwasser

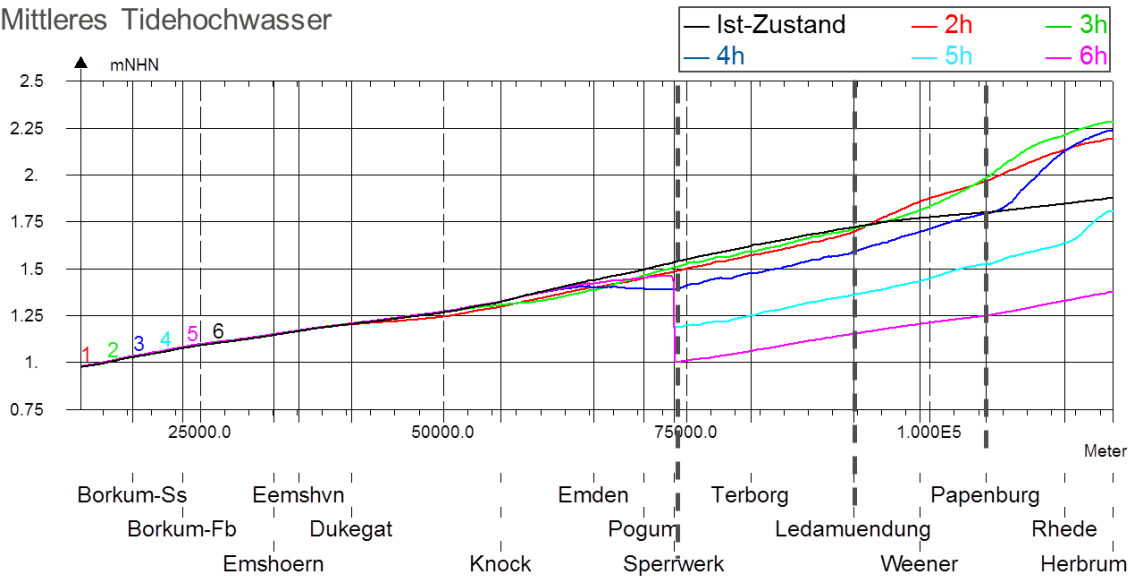


Bild 63: Mittleres Tidehochwasser in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

Mittleres Tideniedrigwasser

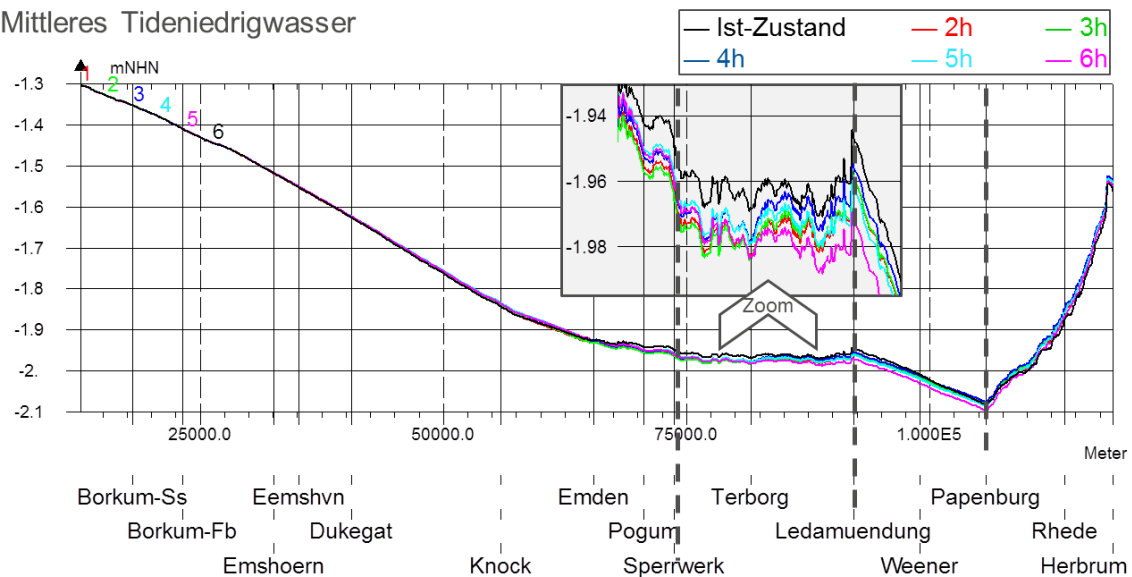


Bild 64: Mittleres Tidehochwasser in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

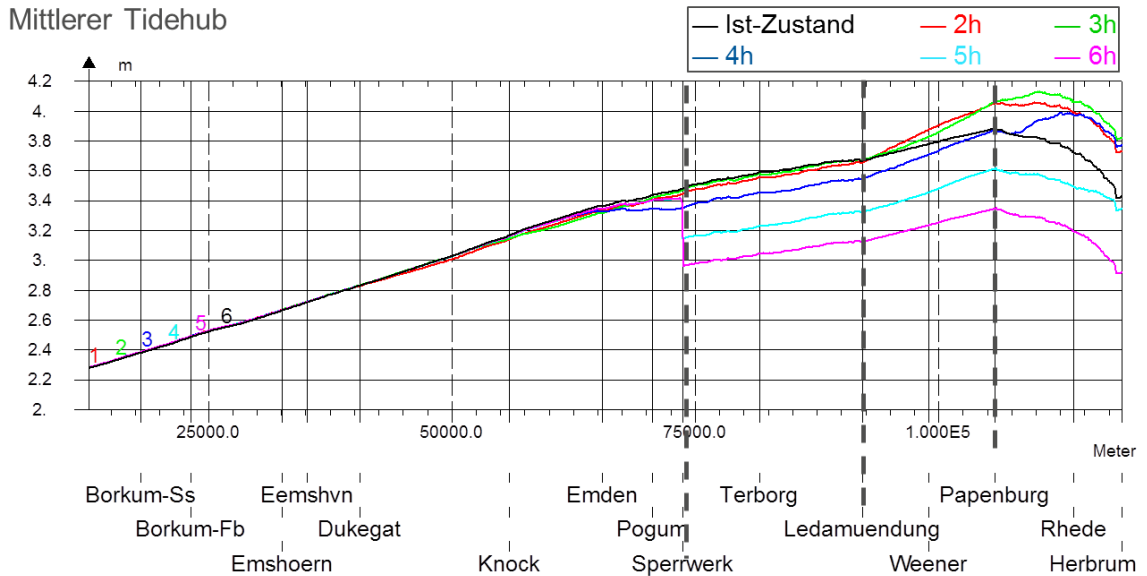


Bild 65: Mittlerer Tidehub in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

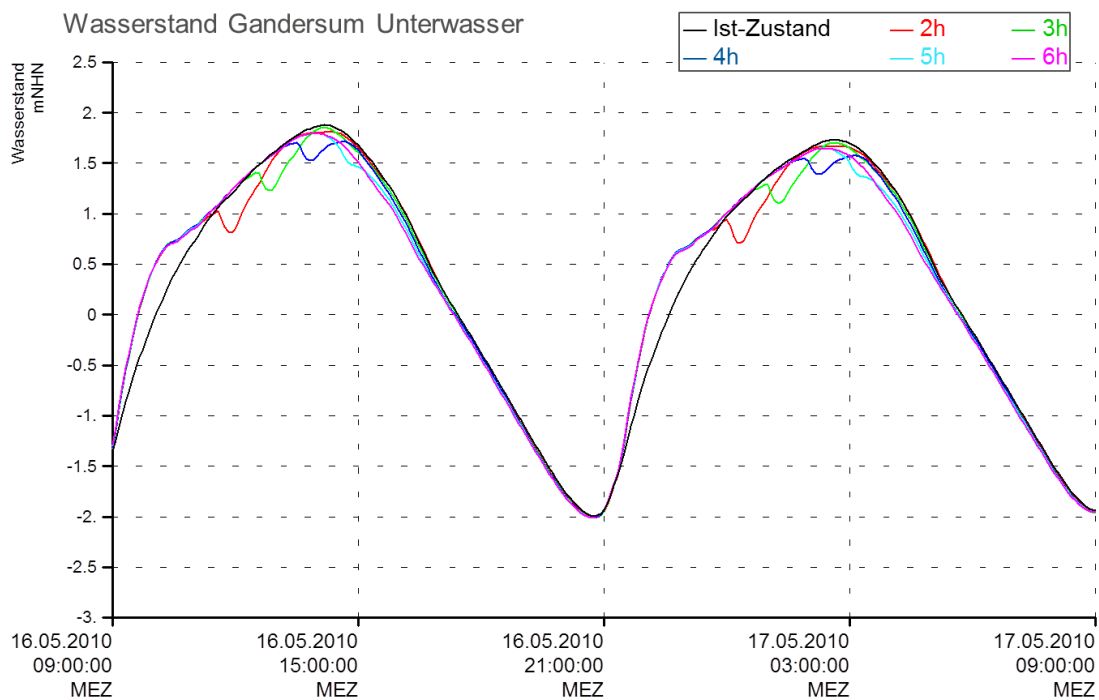


Bild 66: Wasserstand im Unterwasser des Emssperrewerks für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

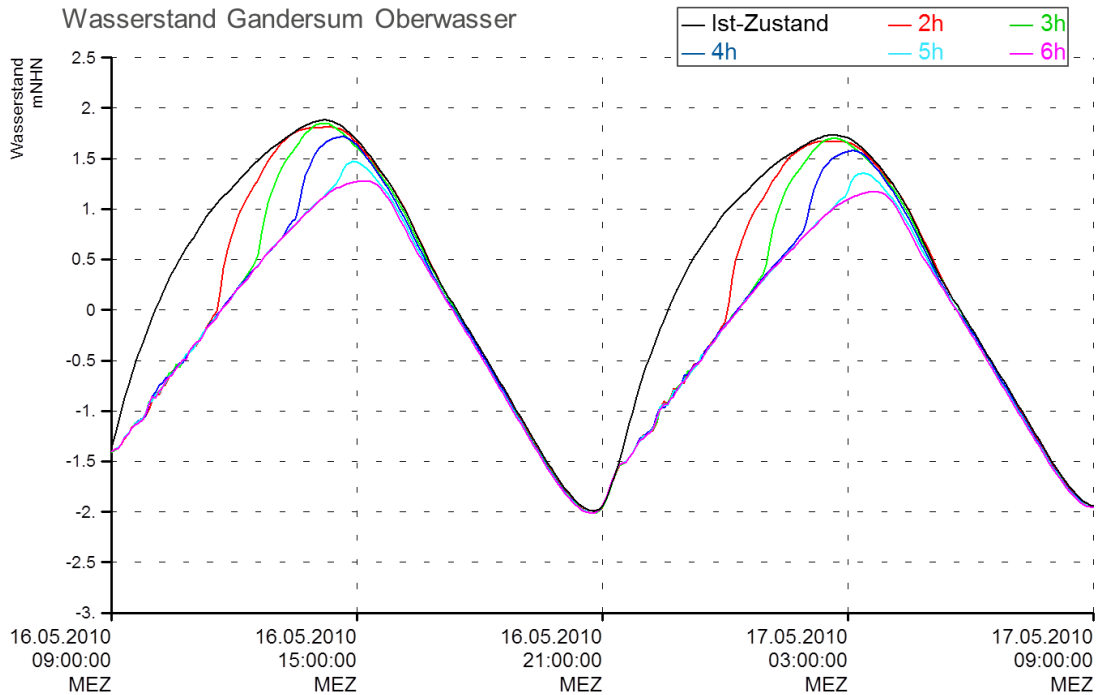


Bild 67: Wasserstand im Oberwasser des Emssperrwerks für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

	Ems-km							DEK-km	
	30	25	20	15	10	5	0	220	215
Originäre Schwallwelle	12:00	12:10	12:25	12:35	12:45	12:55	13:10	13:25	13:35
Reflektierte Schwallwelle	15:45	15:30	15:20	15:10	15:00	14:45	14:35	14:15	14:00

Tabelle 3: Ankunftszeit der originären Schwallwelle und der reflektierten Schwallwelle der 2h- Sohlschwelle am 01.05.2010

Vergleich Wasserstand und Steigung der 2h-Steuerung an den Ems-km 0, 5 und 10

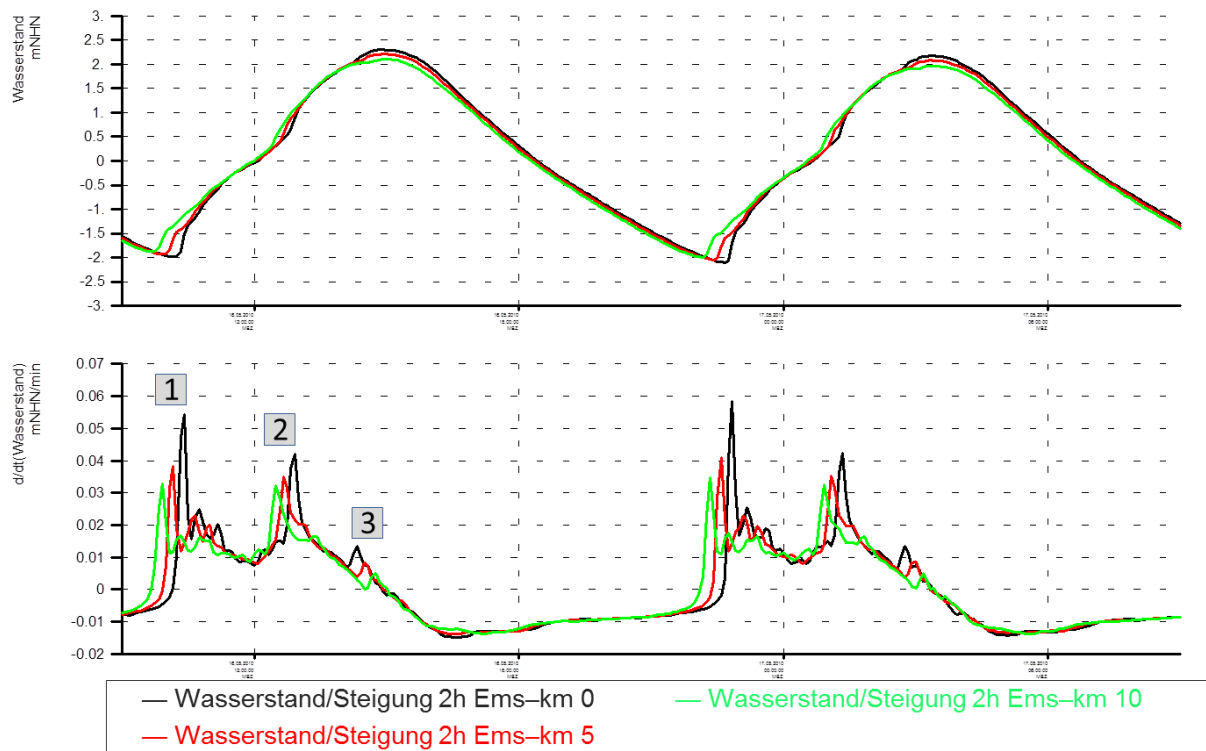


Bild 68: Vergleich des Wasserstandes und der Steigung des Wasserstandes der 2h-Sohlschwelle an den Ems-km 0, 5 und 10 (Fahrinnenmitte) vom 16.05.2010 9:00 Uhr bis zum 17.05.2010 9:00 Uhr.

Aufgrund der Querschnittseinengung im Flutstrom tritt der Flutstromkenterpunkt bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle stromauf von Knock später ein als im Ist-Zustand. Die Eintrittszeit der Ebbestromkenterung wird kaum beeinflusst. Die Verzögerung des Flutstromkenterpunktes ist abhängig von der Dauer, die die flexible Sohlschwelle aktiv ist und variiert zwischen Emssperrwerk und Ledamündung von ca. 25 Minuten bei der 2h-Sohlschwelle bis ca. 70 Minuten bei der 6h-Sohlschwelle. Stromauf der Ledamündung fällt die Verzögerung im Vergleich zum Ist-Zustand bei allen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom größer aus (Bild 69).

Diese Veränderung der Eintrittszeit der Flutstromkenterung bedingt bei gleichzeitiger kaum veränderter Eintrittszeit der Ebbestromkenterung eine Verlängerung der Flutstromdauer im Vergleich zum Ist-Zustand. Diese Verlängerung bewegt sich in der Größenordnung der Verzögerung des Flutstromkenterpunktes. Entsprechend zur Verlängerung der Flutstromdauer wird die Ebbestromdauer stromauf von Knock in allen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom verkürzt (Bild 71 und Bild 72).

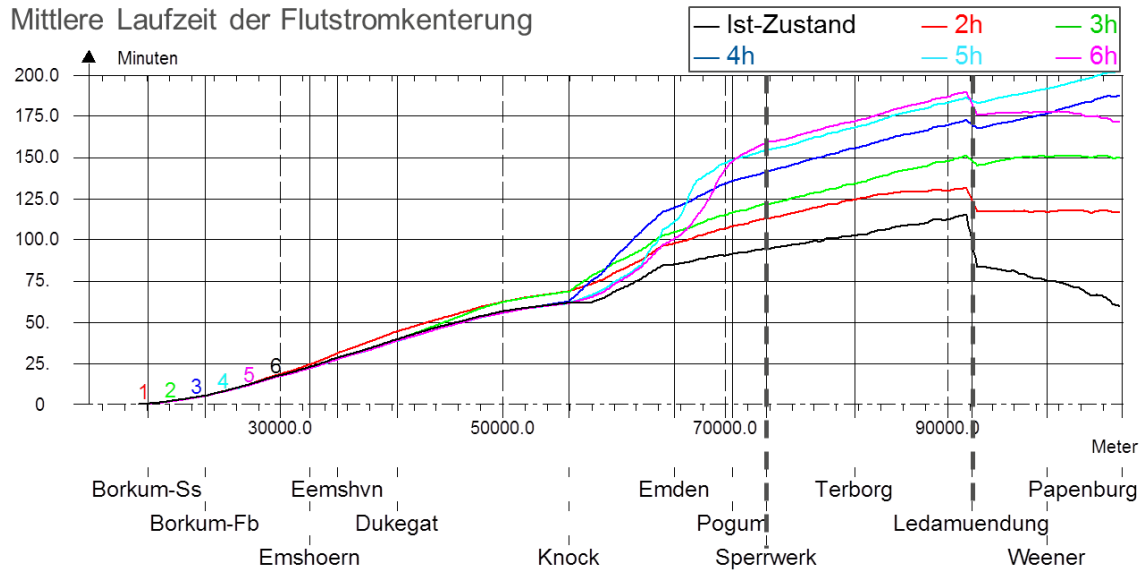


Bild 69: Mittlere Laufzeit der Flutstromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

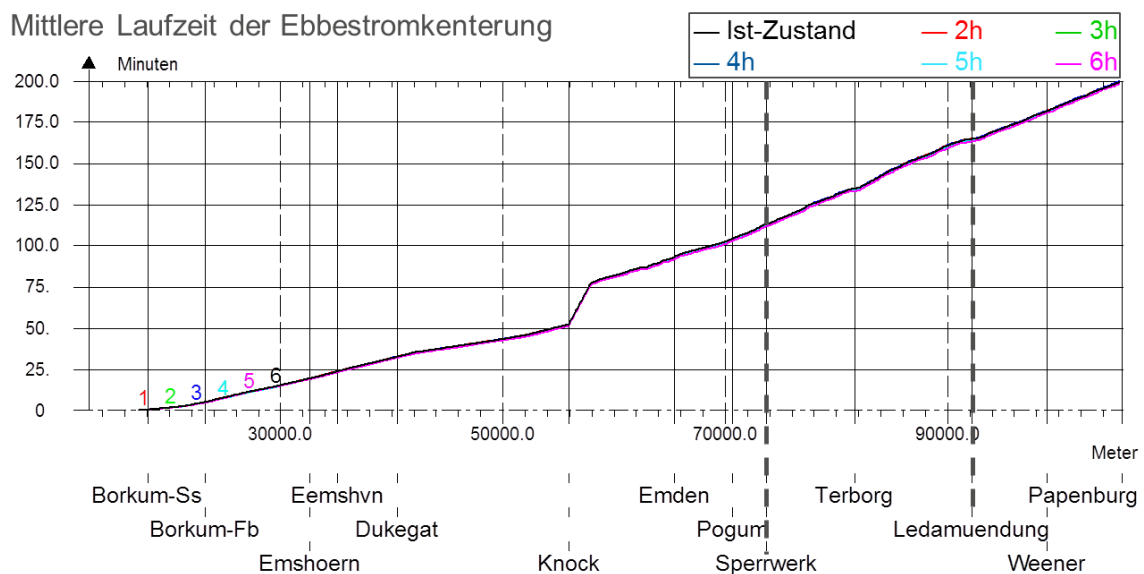


Bild 70: Mittlere Laufzeit der Ebbestromkenterung im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

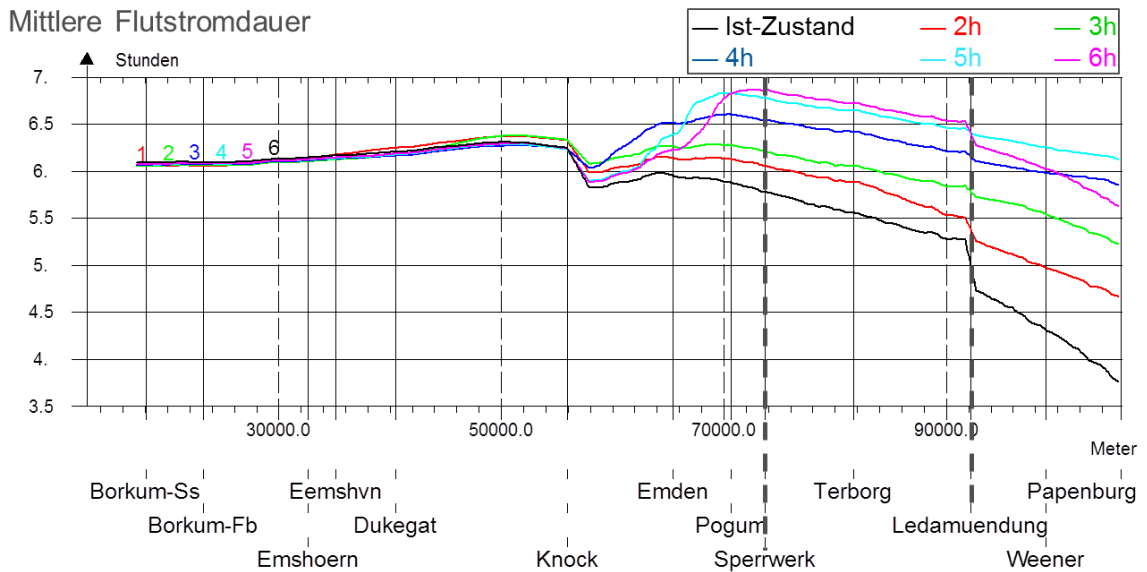


Bild 71: Mittlere Flutstromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

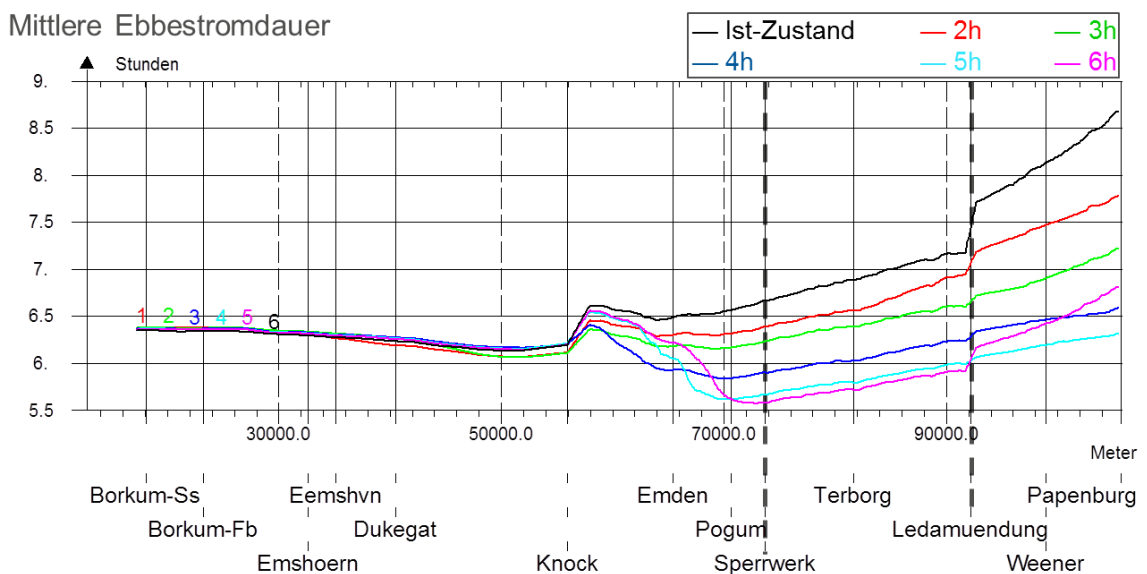


Bild 72: Mittlere Ebbestromdauer im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

Aus Bild 73 ist bei allen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom eine Reduzierung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit besonders stromauf von Knock erkennbar. Dies lässt sich durch die Abnahme des Tidestromvolumens in Kombination mit der Verlängerung der Flutstromdauer erklären. Je länger die flexible Sohlschwelle aktiv ist, desto geringer ist die

mittlere Flutstromgeschwindigkeit. Bei der 6h-Sohlschwelle reduziert sich die Geschwindigkeit so stromauf von Knock um 0,15 m/s bis 0,25 m/s.

Die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten erhöhen sich in allen Szenarien stromauf von Pogum. In diesem Bereich ist jedoch kein direkter Zusammenhang zur Dauer, wie lange die flexible Sohlschwelle aktiv ist, erkennbar. Die höchsten mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten weist die 4h-Sohlschwelle auf, die niedrigsten die 2h- und 6h-Sohlschwelle (Bild 74). Als Grund für die hohen Ebbestromgeschwindigkeiten der 4h-Sohlschwelle kann das relativ hohe Ebbestromvolumen der 4h-Sohlschwelle bei einer gleichzeitig relativ kurzen Ebbestromdauer angesehen werden. Insgesamt fällt die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit zum Ist-Zustand stromauf von Knock im Ebbestrom geringer aus als im Flutstrom. Stromabwärts von Knock werden in allen Szenarien sowohl die Flutstrom- als auch die Ebbestromgeschwindigkeiten leicht reduziert.

Das Verhältnis der mittleren Flut- zu mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten verändert sich stromauf von Knock zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeit (Bild 75). Zwischen Pogum und der Ledamündung ist die Veränderung des Verhältnisses desto größer je länger der Querschnitt am Emssperrwerk eingengt wird. Stromabwärts von Knock treten nur sehr geringe Veränderungen des Verhältnisses der mittleren Flut- zu mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten auf.

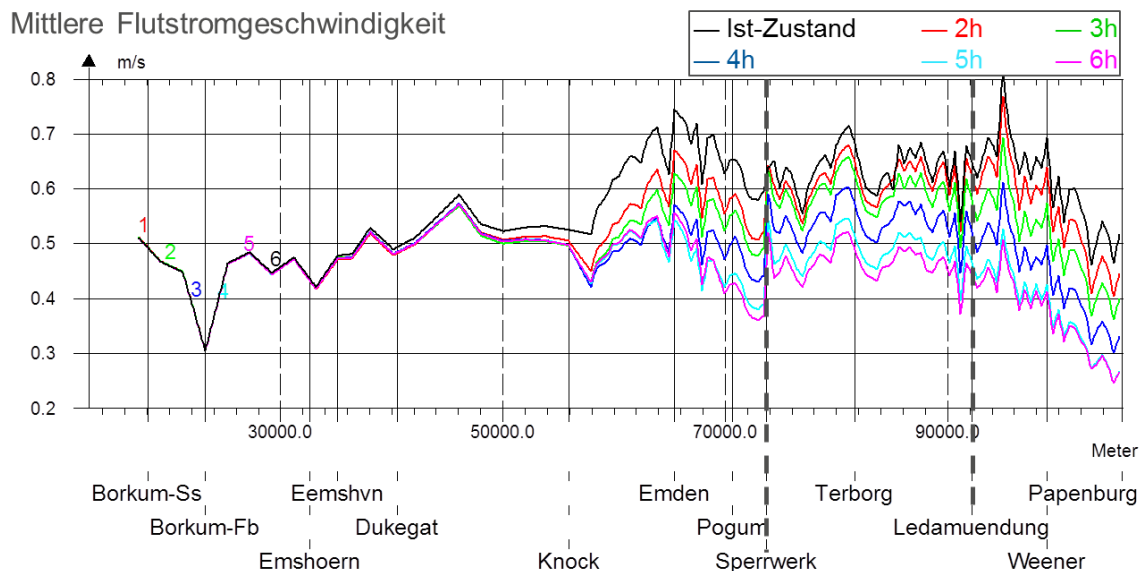


Bild 73: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

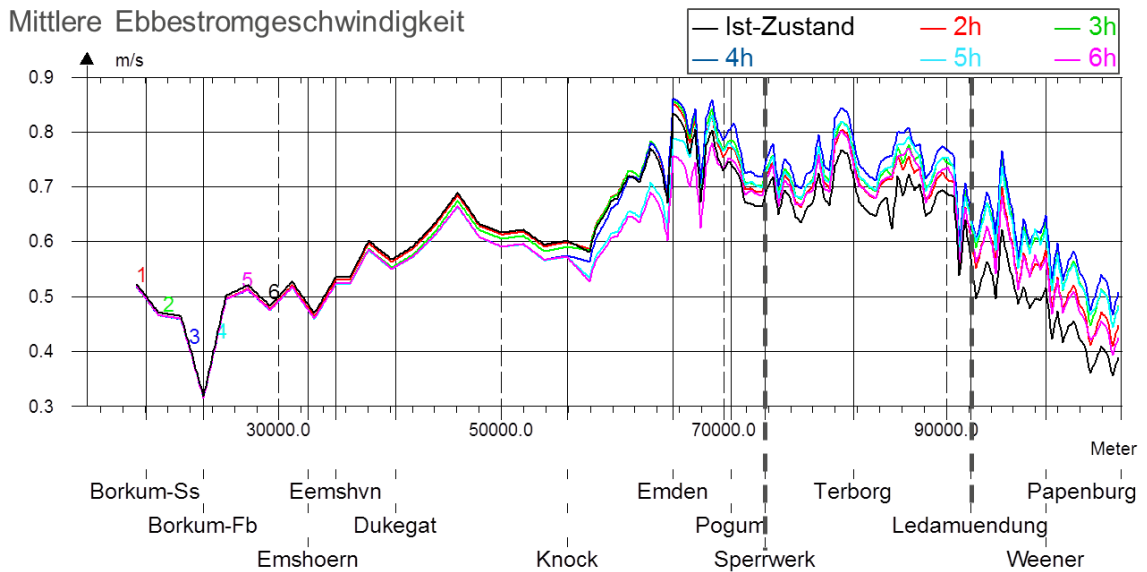


Bild 74: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

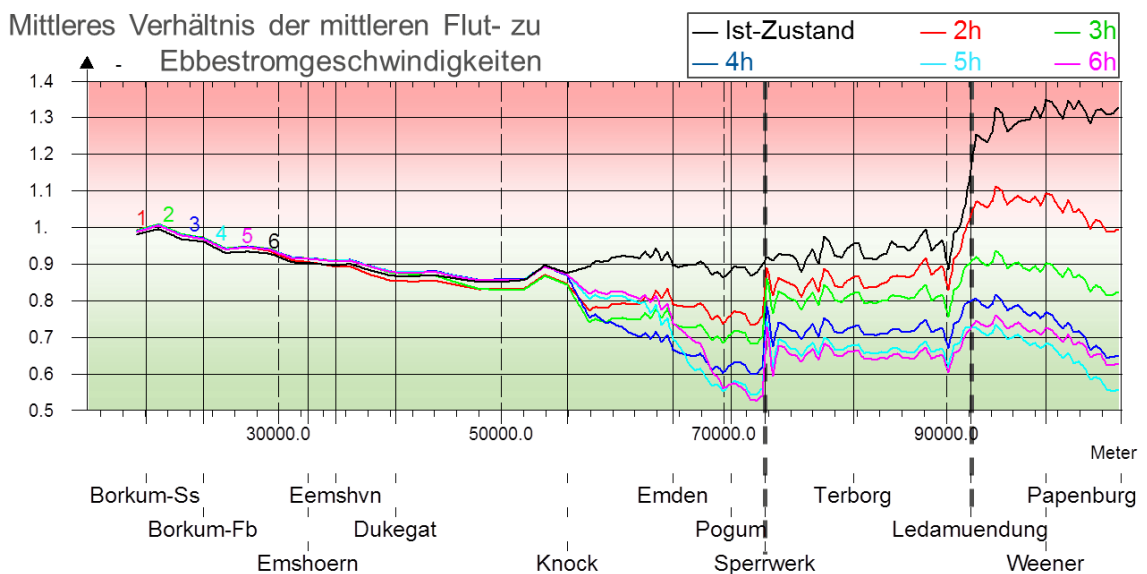


Bild 75: Mittleres Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die mittlere Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit.

Wie in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben bildet sich während des aktiven Betriebs der flexiblen Sohlschwelle aufgrund der Querschnittseinengung eine Strömungsfahne mit hohen Strö-

mungsgeschwindigkeiten, welche in der Hauptschiffahrtsöffnung beginnt. Bei den Varianten, in denen die flexible Sohlschwelle im Flutstrom relativ kurz aktiv ist, ist eine größere Ausdehnung des Bereichs hoher Strömungsgeschwindigkeiten erkennbar. Dieses ist zum einen durch das höhere Tidestromvolumen dieser Sohlschwellenvarianten und zum anderen durch die zum Zeitpunkt der Öffnung der Sperrwerkstore vorherrschenden höheren Strömungsgeschwindigkeiten begründet. Die Dauer hoher Geschwindigkeiten ist hingegen abhängig von der Dauer der Querschnittseinengung und somit bei der 5h- und 6h-Sohlschwelle am größten (Bild 76).

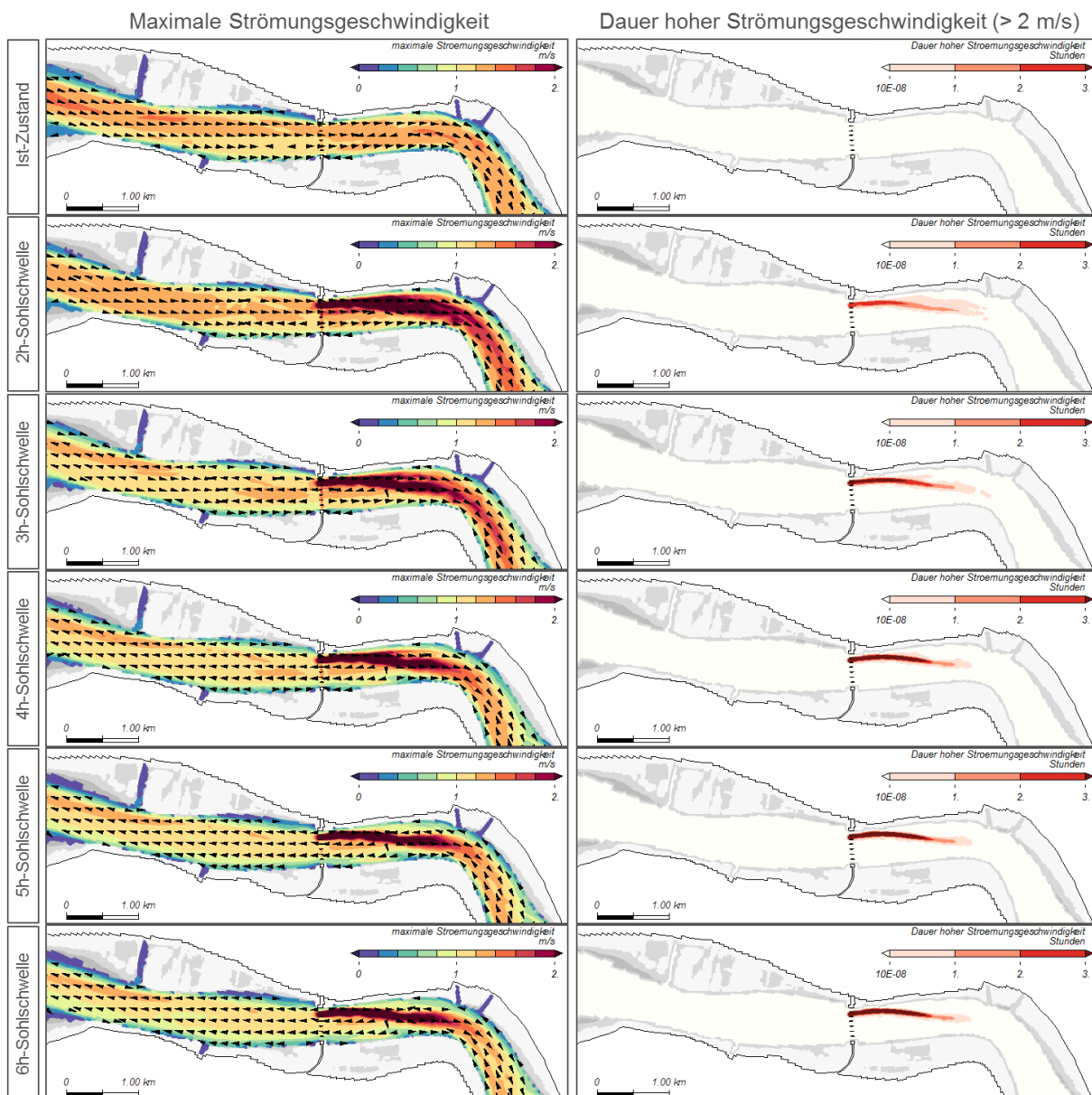


Bild 76: Maximale Strömungsgeschwindigkeit (linke Seite) und die Dauer hoher Strömungsgeschwindigkeiten größer als 2 m/s (rechte Seite) während der Tide am 16.5.2010 zwischen 02:30 und 16:00 Uhr für den Ist-Zustand (Oben) und die flexible Sohlschwelle im Flutstrom mit ein Dauer von 2 Stunden (2.v.o), 3 Stunden (3.v.o), 4 Stunden (3.v.u), 5 Stunden (2.v.u) und 6 Stunden (Unten).

5.2.2.2 Wirkung auf die Salzintrusion

Eine Veränderung des maximalen Salzgehalts durch die Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ist in Bild 39 vorwiegend stromauf von Emden erkennbar. Den höchsten maximalen Salzgehalt weisen die 2h- und 3h-Sohlschwelle auf, den niedrigsten die 5h- und 6h-Sohlschwelle, wobei die Variation des Salzgehaltes zwischen den verschiedenen Szenarien bei ca. 2 PSU liegt. Bis zum Emssperrwerk nimmt der Salzgehalt bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom im Vergleich zum Ist-Zustand ab. Stromab des Sperrwerks tritt eine durchgängige Verringerung des maximalen Salzgehalts lediglich in der 5h- und 6h-Sohlschwelle auf. Bei der 2h- bis 4h-Sohlschwelle wird der Salzgehalt des Ist-Zustandes in der Unterems teilweise überschritten. Diese Veränderungen der Salzintrusion werden, wie in Kapitel 5.1.2 und 5.2.1.2 beschrieben, von Veränderungen der baroklinen Zirkulation und der Transportwege beeinflusst.

Bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom ist am Emssperrwerk eine sprunghafte Abnahme des Tidemittelwassers zu beobachten (Bild 78), welche desto größer ist, je länger die flexible Sohlschwelle aktiv ist. Diese Abnahme führt zu einer Zunahme der Salzintrusion in die Unterems. Stromauf des Sperrwerks erhöht sich die Steigung des Tidemittelwassers im Vergleich zum Ist-Zustand und so auch der mittlere barotrope Druckgradient, was einen verringerten stromauf gerichteten Salztransport mit der baroklinen Zirkulation bedingt. Die größte Steigung des Tidemittelwassers weist die 4h-Sohlschwelle, die geringste die 2h-Sohlschwelle auf.

Der mittlere Ebbe- und Flutstromweg werden in der Unterems nur bei der 5h- und 6h-Sohlschwelle durchgängig verringert. Vor allem stromauf der Ledamündung sind bei der 2h- und 3h-Sohlschwelle im Vergleich zum Ist-Zustand längere Transportwege erkennbar (Bild 79 und Bild 80). Entscheidend für die Salzintrusion ist das Verhältnis des Ebbe- und des Flutstromweges (Bild 81). Dieses verändert sich bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom zwischen Knock und Emssperrwerk zu Gunsten des Ebbestroms, so dass die Salzintrusion in diesem Bereich abnimmt. Zwischen Emssperrwerk und Ledamündung tritt eine leichte Verschiebung des Verhältnisses in Richtung Flutstrom auf, was eine Zunahme der Salzintrusion bedeutet. Stromauf der Ledamündung ist bei der 2h- und 3h-Sohlschwelle eine Zunahme der Salzintrusion und bei der 5h- und 6h-Sohlschwelle eine Abnahme sichtbar. Das Verhältnis der 4h- Sohlschwelle ist dem Ist-Zustand in diesem Abschnitt sehr ähnlich.

Zur Erklärung des erhöhten Salzgehaltes dieser Varianten, in den die flexible Sohlschwelle für eine relativ kurze Zeit aktiv ist, kann neben den beschriebenen Veränderungen der baroklinen Zirkulation und der Transportwege auch die durch das Öffnen der Sperrwerkstore hervorgerufenen Schwallwelle herangezogen werden (s. Kapitel 5.2.2.1). Bedingt durch die Schwallwelle kommt es nach dem Strömungsmaximum zu Beginn des Flutstroms bei einigen

Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom zu einem zweiten Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 82). Diese erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten in der zweiten Hälfte des Flutstroms bewirkten eine veränderte Steigung der Salzgehaltskurve (Bild 83).

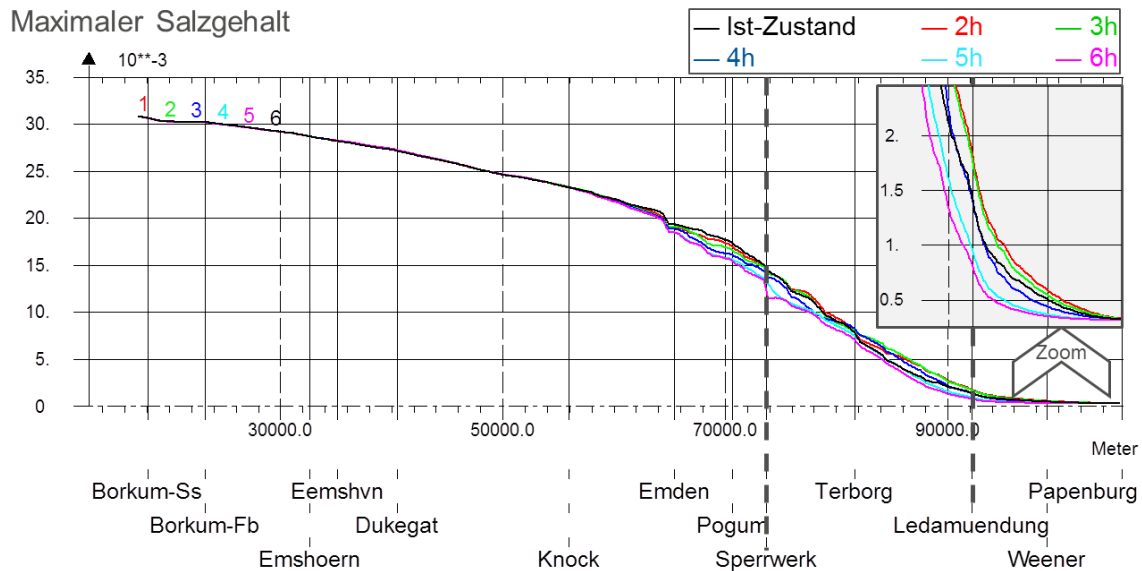


Bild 77: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

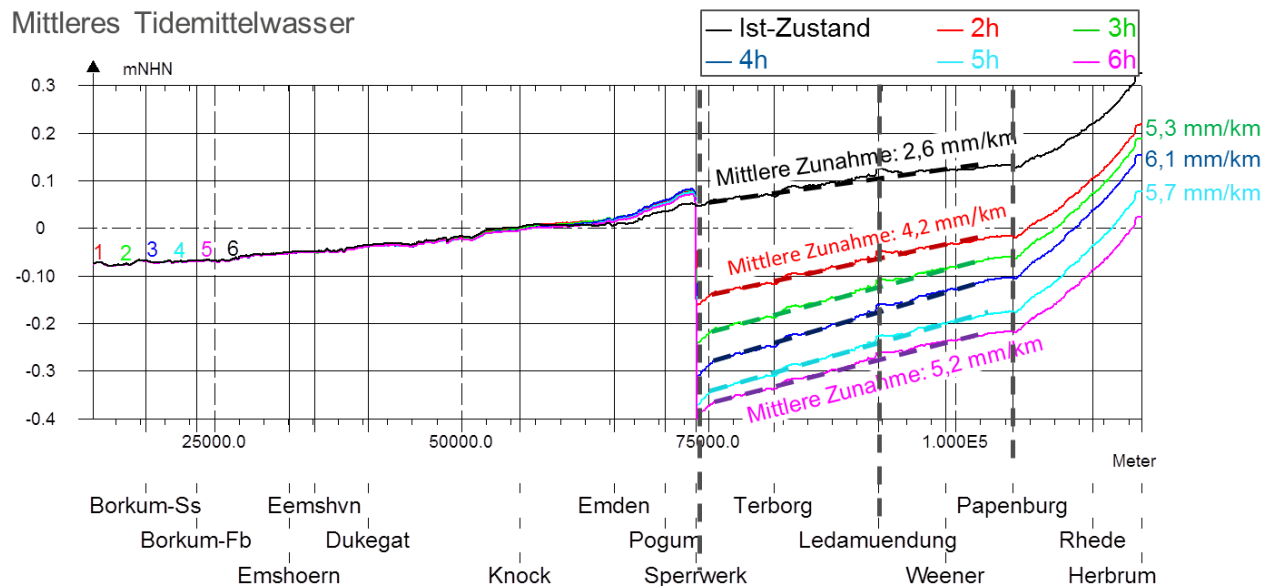


Bild 78: Mittleres Tidemittelwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom. Für den Abschnitt Ems-Kilometer 30 (stromauf Emssperrwerk) bis Ems-Kilometer 0 (Papenburg) ist eine lineare Regression durchgeführt worden: Die Steigungen dieser Geraden sind angegeben.

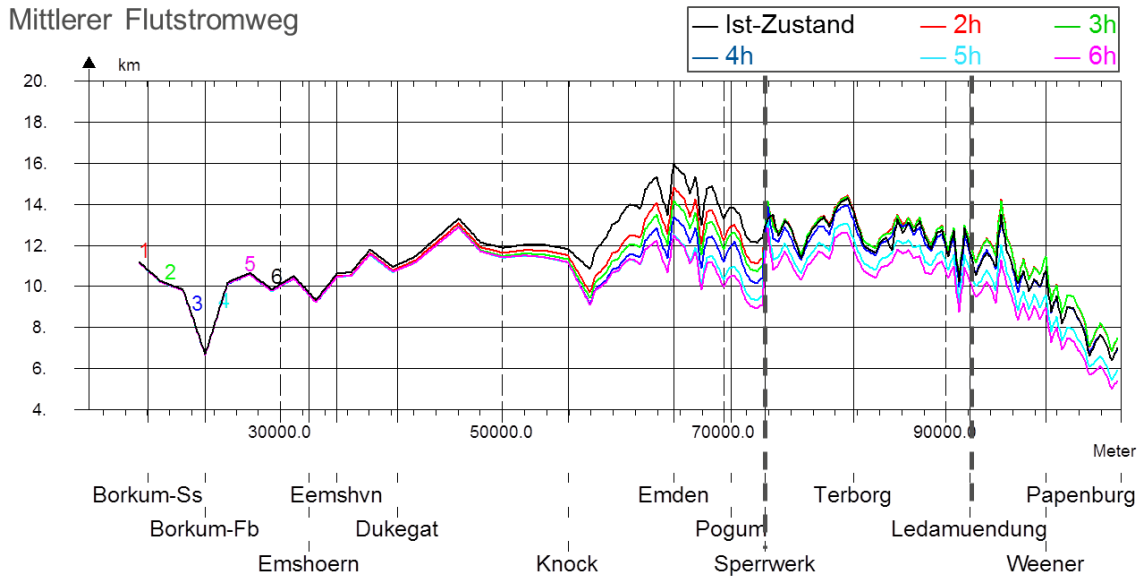


Bild 79: Mittlerer (eulerscher) Flutstromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung). Der Flutstromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und der Flutstromdauer.

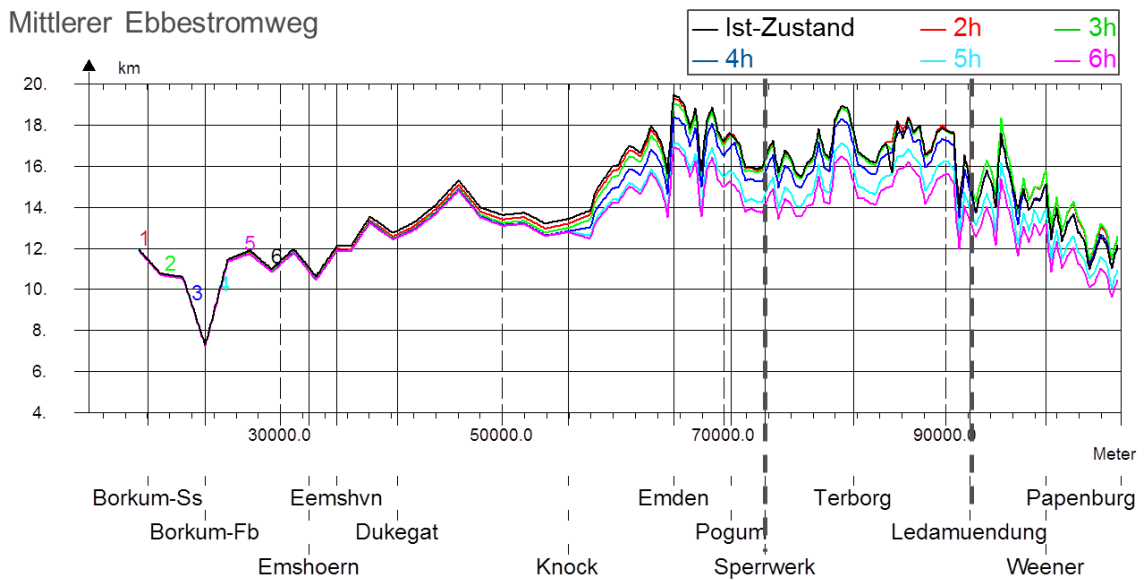


Bild 80: Mittlerer (eulerscher) Ebbestromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung). Der Flutstromweg ist näherungsweise das Produkt der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit und der Ebbestromdauer.

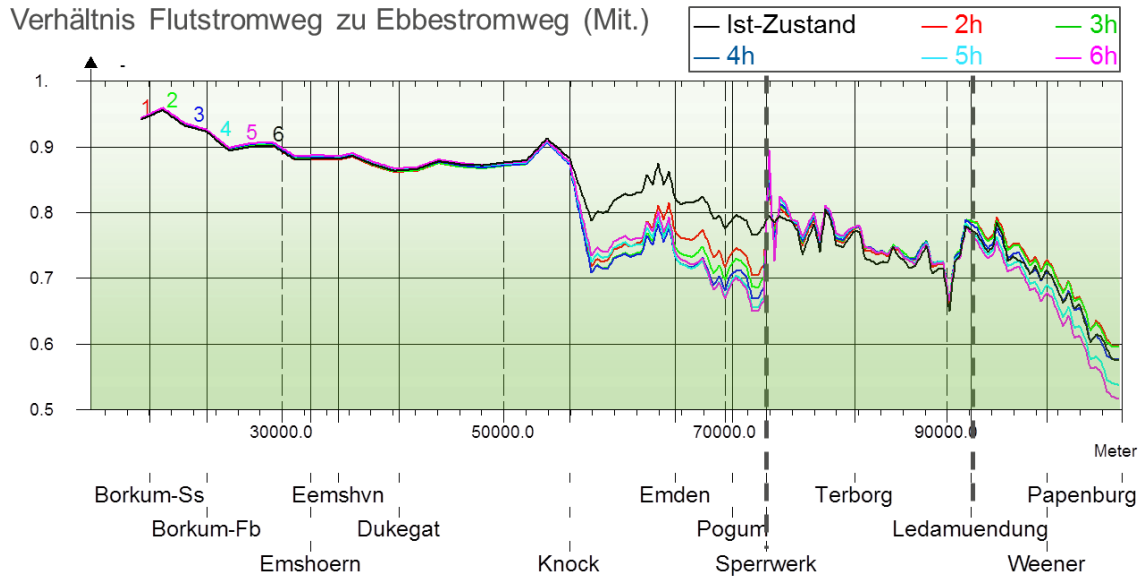


Bild 81: Mittleres Verhältnis der Flut- zu Ebbestromweg im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung). Werte kleiner 1 (grüner Hintergrund) zeigen an, dass die Ebbestromwege größer sind als die Flutstromwege.

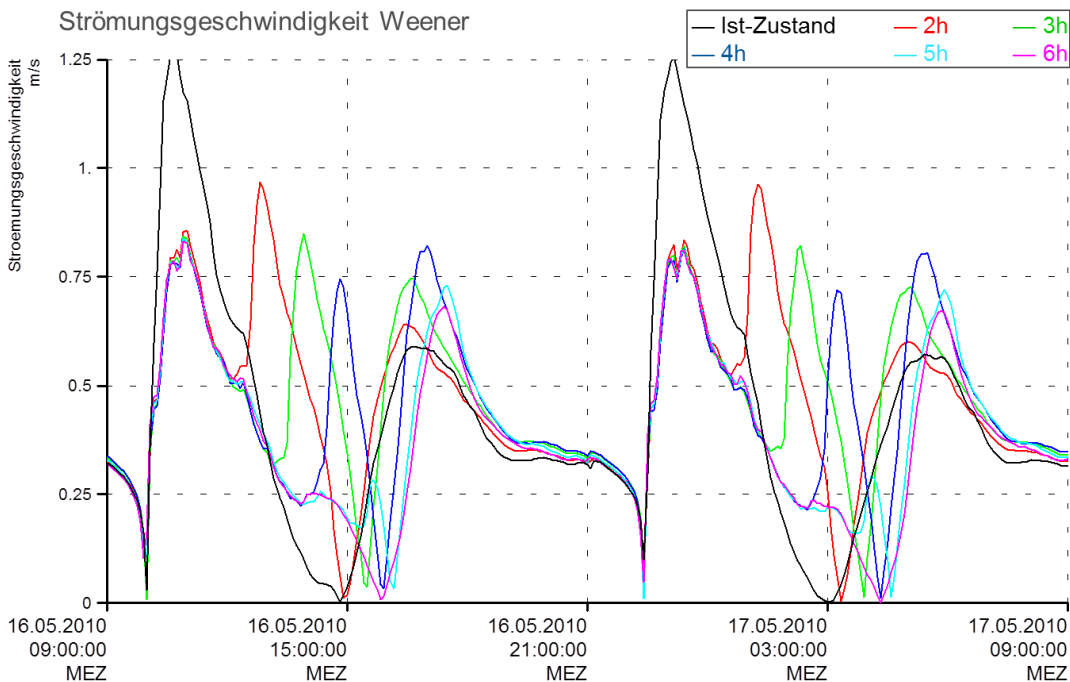


Bild 82: Strömungsgeschwindigkeit bei Weener für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

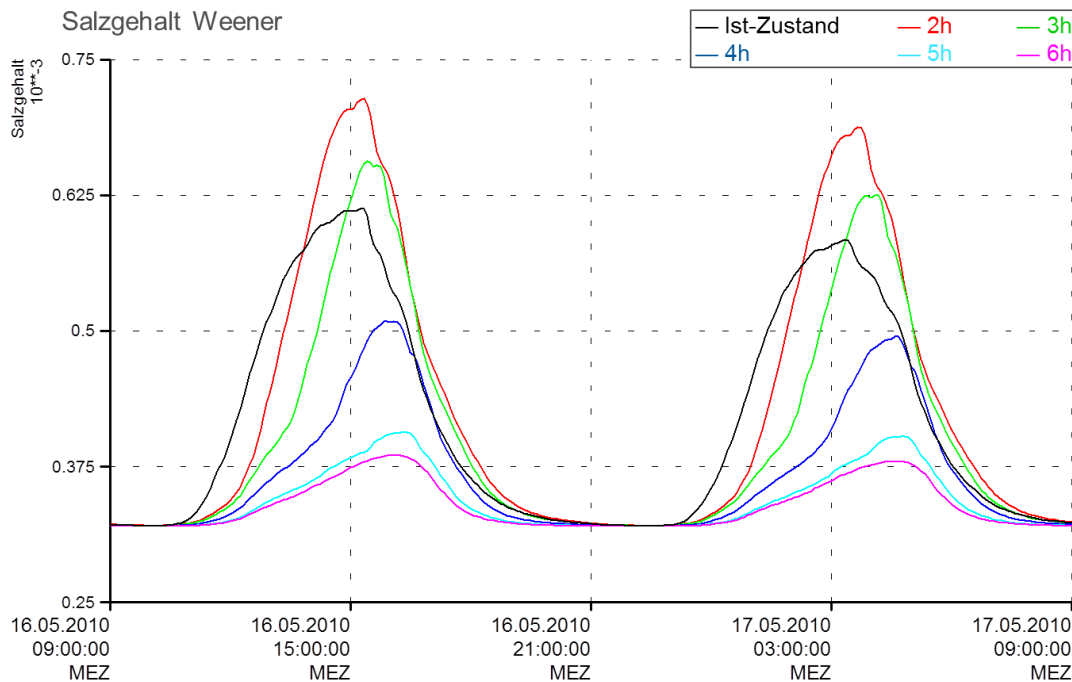


Bild 83: Salzgehalt bei Weener für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom.

5.2.2.3 Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt

Stromauf des Emssperrwerks/Terborg ist eine Reduzierung des Schwebstoffgehalts im Vergleich zum Ist-Zustand bei allen fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom zu beobachten, was sich aus der Abnahme der Flutstromgeschwindigkeit begründet. Diese Verringerung fällt beim maximalen Schwebstoffgehalt größer aus als beim mittleren Schwebstoffgehalt (Bild 84 und Bild 85). Der Schwebstoffgehalt ist in diesem Bereich desto niedriger je länger die Querschnittseinengung andauert.

Zwischen Knock und dem Emssperrwerk tritt hingegen eine Erhöhung sowohl des mittleren als auch des maximalen Schwebstoffgehalts auf. Dies wird durch eine in den Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom unterschiedliche Verschiebung des Trübungsmaximums beeinflusst. Der seewärtige Beginn der Zone hohen Schwebstoffgehalts variiert mit der Tide, er wird im Flutstrom stromauf und im Ebbestrom stromab verschoben (Bild 86). Aufgrund der niedrigeren Flutstromgeschwindigkeiten (Bild 73) und kürzeren Flutstromwegen (Bild 79) in den Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom verschiebt sich der seeseitige Beginn des Trübungsmaximums weniger weit stromauf als im Ist-Zustand. Im Ebbestrom sind die Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten geringer als im Flutstrom und zwischen Knock und Pogum werden die Geschwindigkeiten des Ist-Zustandes abhängig von der Variante der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom über- oder unterschritten (Bild 74). Dieses resultiert in Kombination mit der Verschiebung im Flutstrom ebenfalls in einem weiter stromab beginnenden Trübungsmaximum im Ebbestrom. Da der Schwebstoffgehalt im Ist-Zustand so

erst weiter stromauf ansteigt, liegt der Gehalt in diesem Übergangsbereich in den Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom über dem des Ist-Zustandes. Desweiteren müssen hier auch die durch die flexible Sohlschwelle veränderten Schwebstofftransporte berücksichtigt werden, welche im Folgenden beschrieben werden.

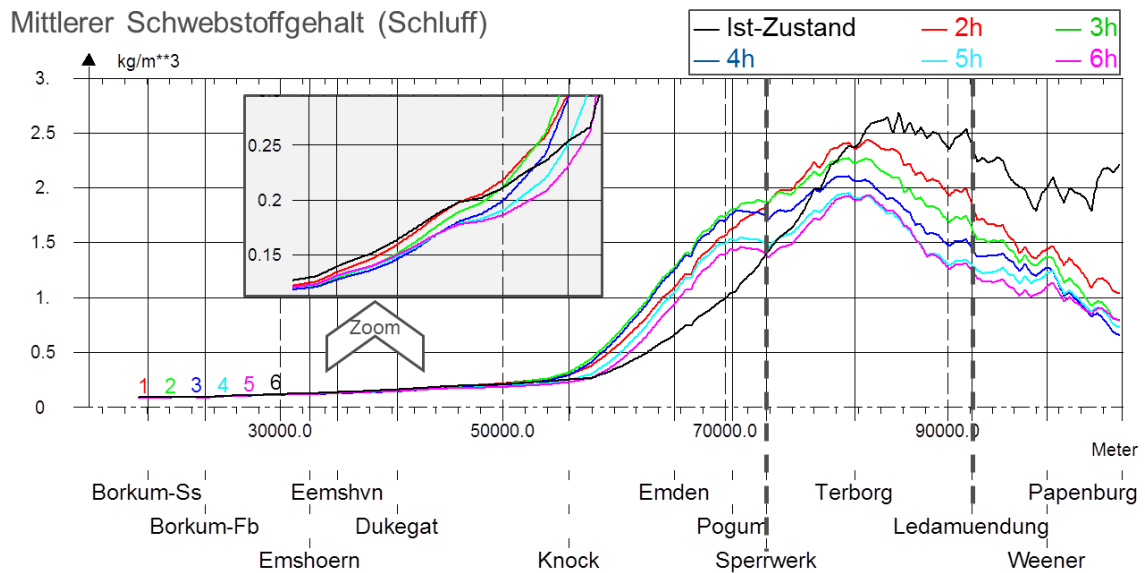


Bild 84: Mittlerer Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

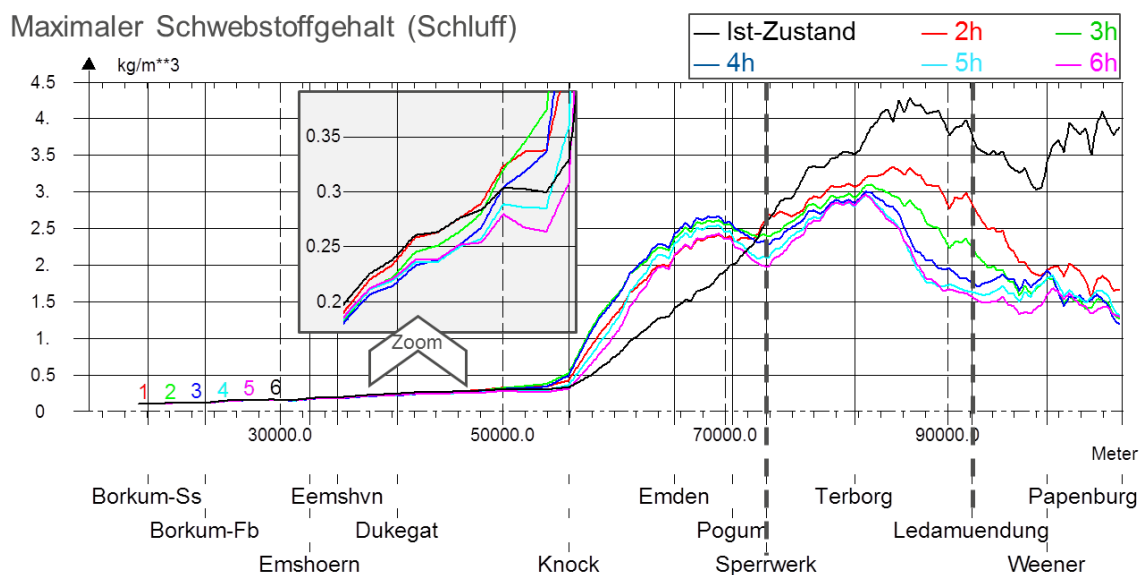


Bild 85: Maximaler Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

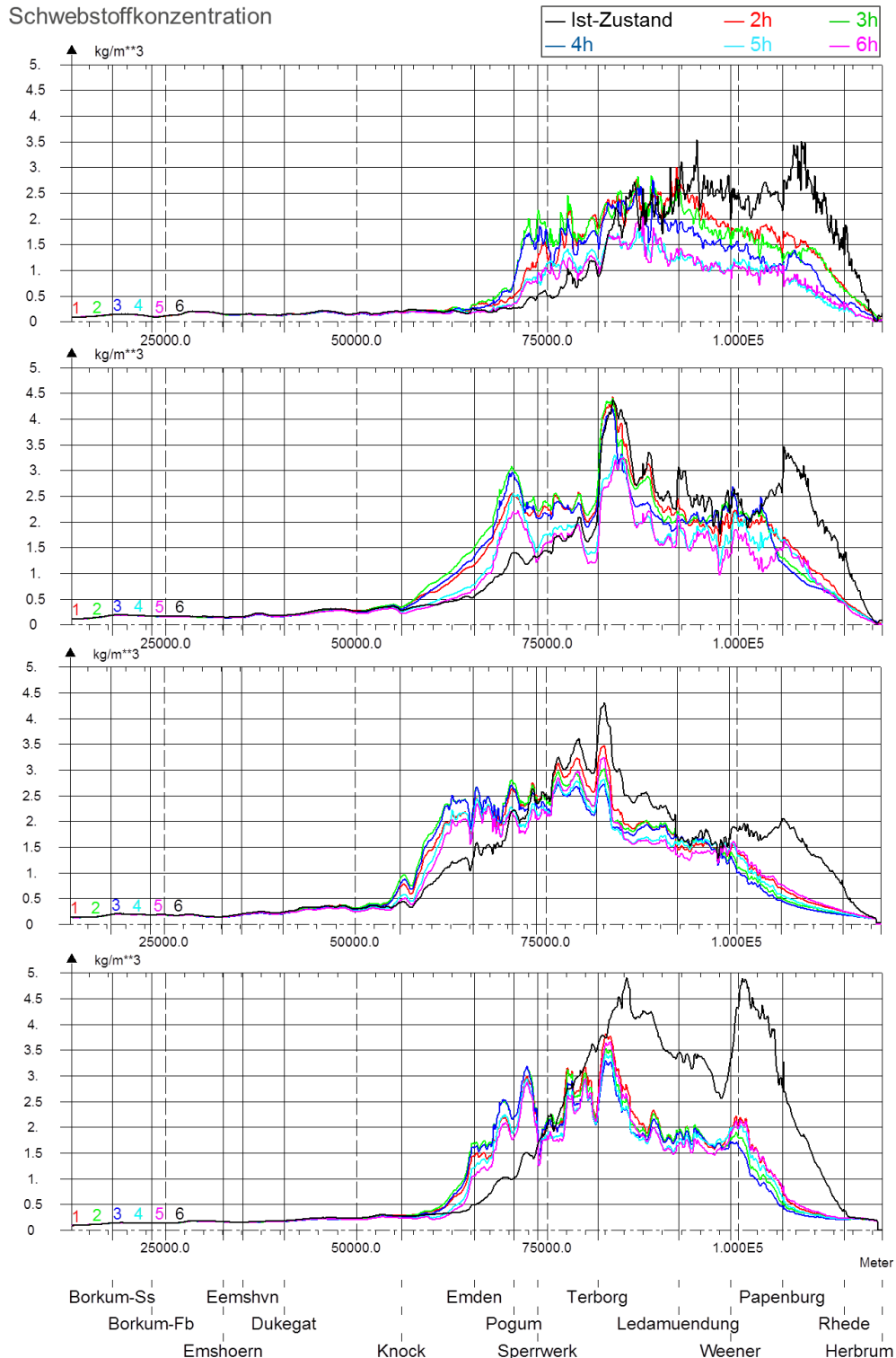


Bild 86: Momentaufnahmen des Schwebstoffgehalts im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom. Oben: Flutstromkenterpunkt am Emssperrwerk (16.05.2010 15:35); 2. Von oben: 2 Stunden und 15 Minuten nach dem Flutstromkenterpunkt (16.05.2010 17:50); 3. von oben: Ebbestromkenterpunkt am Emssperrwerk (16.05.2010 21:15); Unten: 2 Stunden und 15 Minuten nach dem Ebbestromkenterpunkt am Emssperrwerk (16.05.2010 23:25).

Aufgrund des überproportionalen Einflusses von hohen Strömungsgeschwindigkeiten auf die Bodenschubspannung (s. Kapitel 5.2.1.3) werden zunächst noch die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten dargestellt (Bild 87 und Bild 88). Auffällig ist, dass die maximalen, über den Querschnitt und über 28 Tiden gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten des Ist-Zustandes in der 2h-Sohlschwelle teilweise überschritten werden. Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten der 2h-Sohlschwelle sind denen des Ist-Zustandes sehr ähnlich und werden anders als die mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten in der Unterems nicht überall erhöht. Der Unterschied der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den verschiedenen Szenarien ist, vor allem im Flutstrom, größer als bei den mittleren Geschwindigkeiten. Auch im Verhältnis der maximalen Flut- zu maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten ist bei der 2h-Sohlschwelle zwischen Pogum und der Ledamündung keine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand vorhanden (Bild 89). Bei allen anderen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom verändert sich das Verhältnis stromauf von Knock zu Gunsten der Ebbestromgeschwindigkeiten.

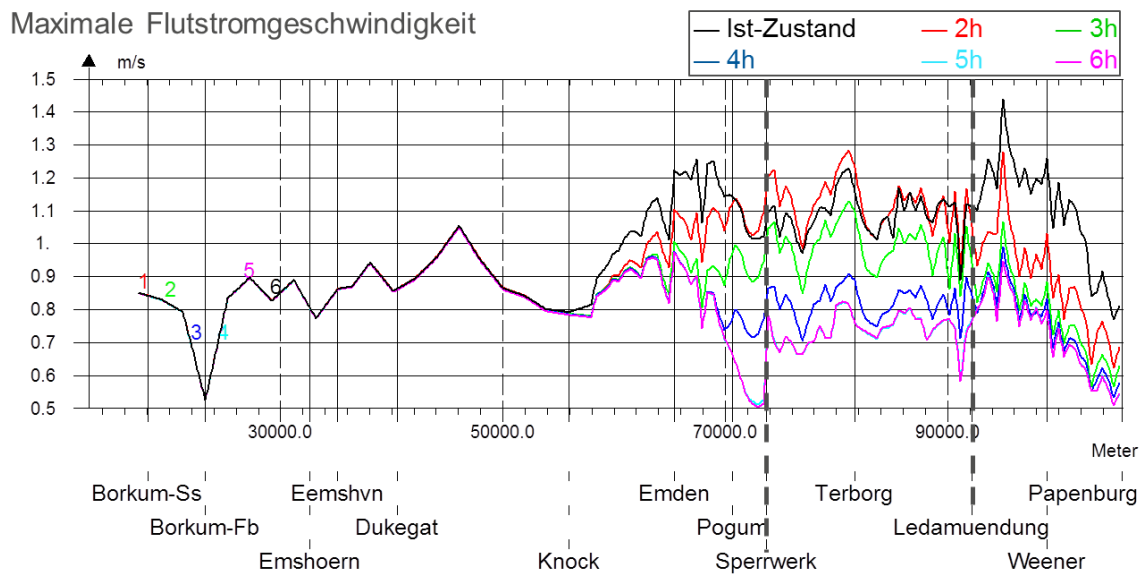


Bild 87: Maximale Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

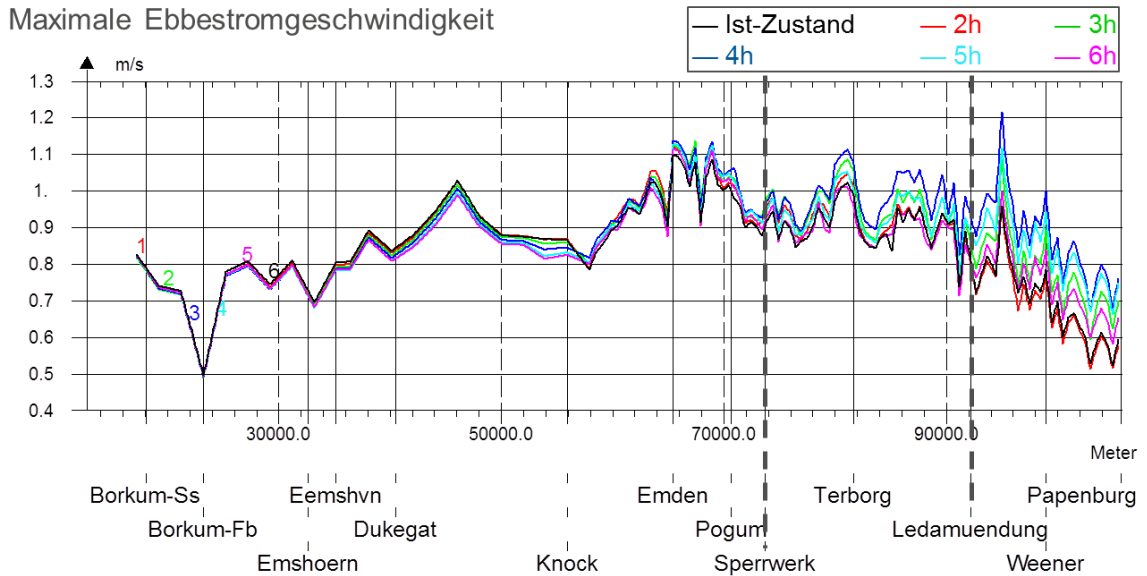


Bild 88: Maximale Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung).

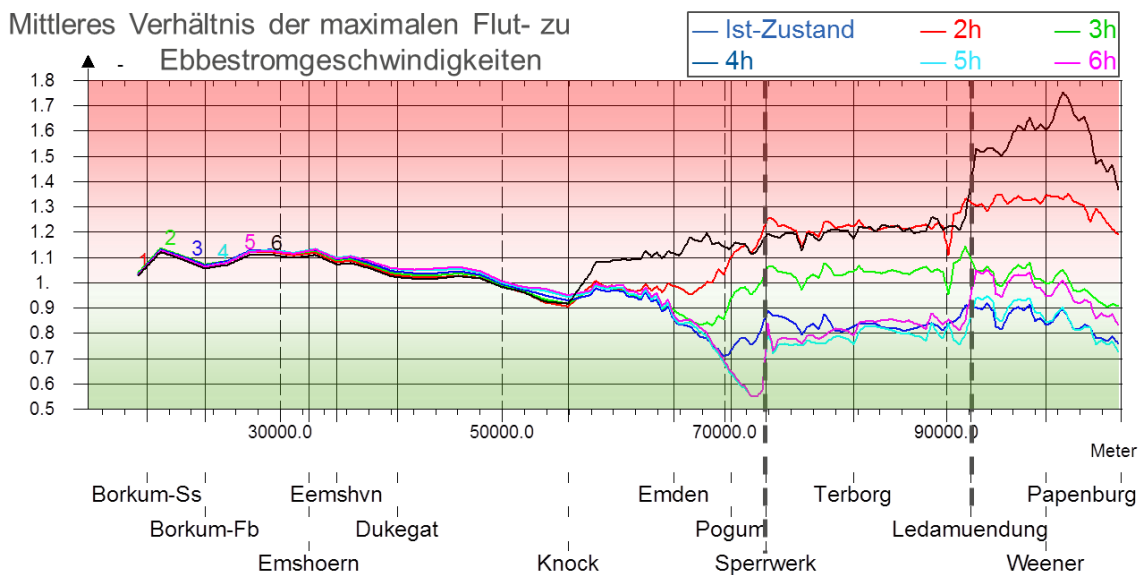


Bild 89: Mittleres Verhältnis der maximalen Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeiten im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Mittelung). Werte größer 1 (roter Hintergrund) zeigen an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit größer ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit. Entsprechend zeigen Werte kleiner als 1 (grüner Hintergrund) an, dass die maximale Flutstromgeschwindigkeit kleiner ist als die maximale Ebbestromgeschwindigkeit.

Die Abnahme des Tidestromvolumens führt generell zu einer Abnahme des Schwebstofftransports, vorausgesetzt, dass sich der Schwebstoffgehalt nicht ändert. Des Weiteren

wird der Transport auch vom Schwebstoffgehalt beeinflusst und weist entsprechend ähnliche Veränderungen auf. Der mittlere Schwebstofftransport wird durch alle fünf Szenarien sowohl im Ebbe- als auch im Flutstrom stromauf des Emssperrwerks/Terborg verringert und zwischen Emssperrwerk und Knock erhöht (Bild 90 und Bild 91). Im Ebbestrom fällt die Verringerung des mittleren Schwebstofftransports in der Unterems deutlich geringer aus als im Flutstrom. Aufgrund der abnehmenden Flutstromgeschwindigkeiten verringert sich der Schwebstoffgehalt in der Unterems im Flutstrom stärker als im Ebbestrom (siehe beispielhaft Bild 86), was somit auch zu einem geringeren Schwebstofftransport im Flutstrom führt. Die Erhöhung des Transportes zwischen Knock und Emssperrwerk ist hingegen im Ebbestrom ausgeprägter vorhanden.

Durch alle fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom wird so stromauf von Knock (mit einigen wenigen Ausnahmen) ein ebbstrom-dominanter Schwebstoff-Transport erzielt (Bild 92). In diesem Bereich wird also mehr Sediment mit dem Ebbestrom stromab transportiert, als mit dem Flutstrom stromauf. Diese Veränderung unterstützt auch die seewärtige Verschiebung der Trübungszone. Die beste Transportbilanz weist die 4h-Sohlschwelle auf, was sich aus den hohen Ebbestromgeschwindigkeiten dieser Variante erklärt.

In der Außenems sind nur sehr geringe Veränderungen des residuellen Schwebstoff-Transports erkennbar, der flutstrom-dominante Schwebstoff-Transport bleibt in allen Szenarien erhalten und wird tendenziell verstärkt.

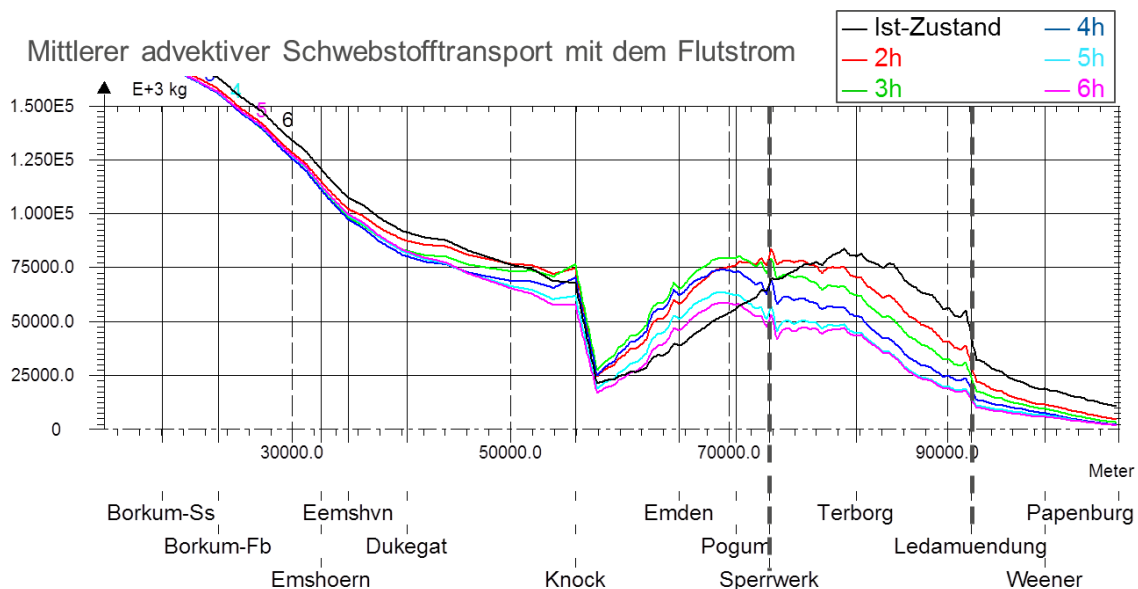


Bild 90: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Integration).

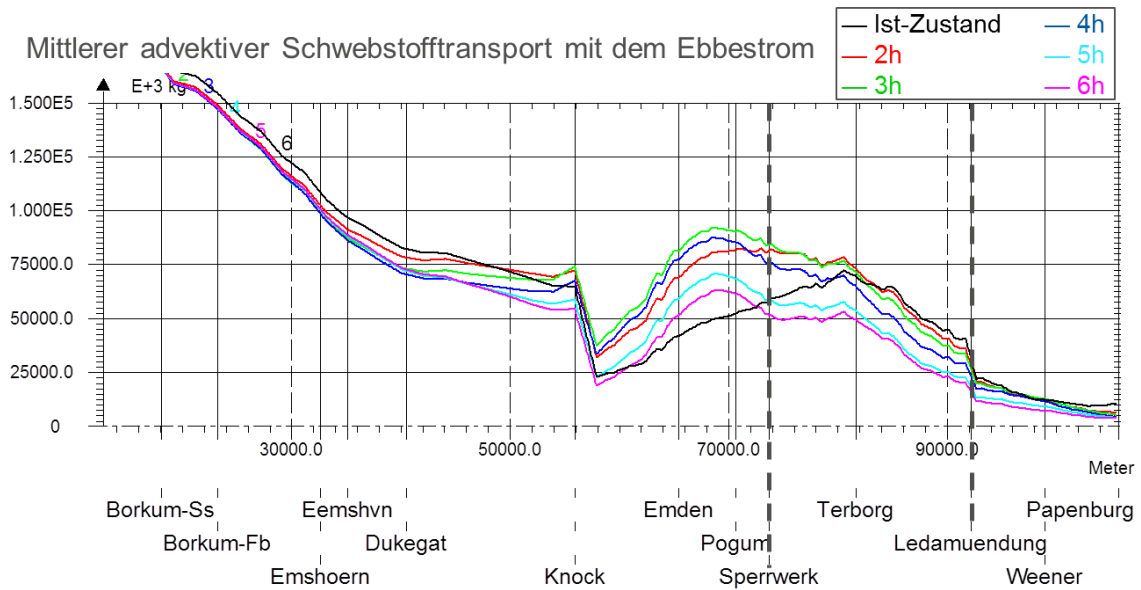


Bild 91: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Integration).

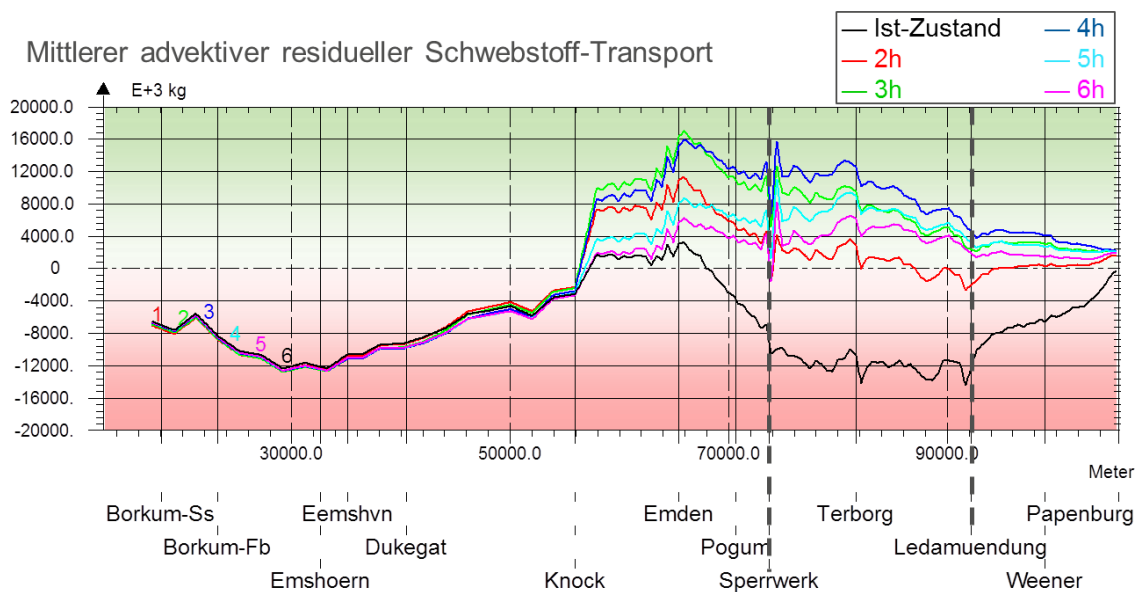
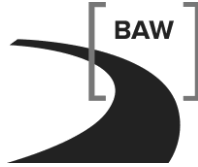


Bild 92: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustand (Schwarz) und die fünf Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom (Querprofil-Integration). Negative Werte (roter Hintergrund) zeigen an, dass der Transport mit dem Flutstrom 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.



5.2.2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die optimale Transportbilanz wird durch die Minimierung der Abnahme des Tidevolumens bei gleichzeitiger Maximierung der Verlängerung der Flutstromdauer erzielt. Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom sollte einerseits nicht während des gesamten Flutstroms aktiv sein, um eine zu starke Reduzierung des Tidestromvolumens zu vermeiden und andererseits nicht zu kurz aktiv sein, um eine ausreichende Verlängerung der Flutstromdauer zu erzielen. Bei den hier untersuchten Varianten besitzt die flexible Sohlschwelle über eine Dauer von 4 Stunden den größten positiven Effekt auf den residuellen Schwebstofftransport. Die gewählte Sohlschwelle ist so ausgelegt, dass sie ohne Umbau des Emssperrwerks prinzipiell realisierbar ist, aber es stellen sich hierbei im Sohlschwellenbetrieb hohe Strömungsgeschwindigkeiten an der HSÖ sowie stromab davon ein. Die Standsicherheit des Emssperrwerks ist für den Lastfall des Sohlschwellenbetriebs daher noch nachzuweisen. Zur Vermeidung von zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten müsste die flexible Sohlschwelle ggf. verbreitert werden. Dies bedeutet, dass ein Umbau oder ein ergänzender Bau am Emssperrwerk notwendig wäre. Es ist zu erwarten, dass eine breitere flexible Sohlschwelle zu einem veränderten residuellen Schwebstofftransport führt und dass ggf. die optimale Dauer des Sohlschwellenbetriebs von den hier erzielten Ergebnissen abweicht.

5.3 Zeitweise geschlossenes Emssperrwerk um Tideniedrigwasser

Bei dieser Variante wird das Emssperrwerk vor Tideniedrigwasser abweichend zu Bild 31 vollständig geschlossen.

Ziel ist einerseits, das Tideniedrigwasser oberstrom vom Emssperrwerk etwa auf das Niveau der dauerhaften Sohlschwelle anzuheben. Deshalb erfolgt die Schließung des Emssperrwerks für jede Tide bei Unterschreiten des Wasserstands $NHN-1m$. Nach Schließung des Emssperrwerks kann oberstrom der Wasserstand nicht mehr nennenswert fallen und das Tideniedrigwasser beträgt etwa $NHN-1m$. Das Sperrwerk wird wieder geöffnet, wenn nach Tideniedrigwasser der Wasserstand unterstrom wieder ansteigt und das Niveau oberstrom erreicht ist, um so das Auftreten von hohen Strömungsgeschwindigkeiten beim Öffnen der Sperrwerkstore zu vermeiden.

Ziel ist andererseits, die im aktiven Zustand der flexiblen Sohlschwelle auftretenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk zu vermeiden. Dies gelingt mit dieser Variante, weil während der vollständigen Schließung des Emssperrwerks keine nennenswerten Strömungsgeschwindigkeiten am Emssperrwerk auftreten können.

Als Vergleichszustand wird hier in allen Abbildungen nicht nur der Ist-Zustand, sondern auch die dauerhafte Sohlschwelle aus Kapitel 5.1 und die 4h-Sohlschwelle im Flutstrom aus Kapitel 5.2.2 dargestellt.

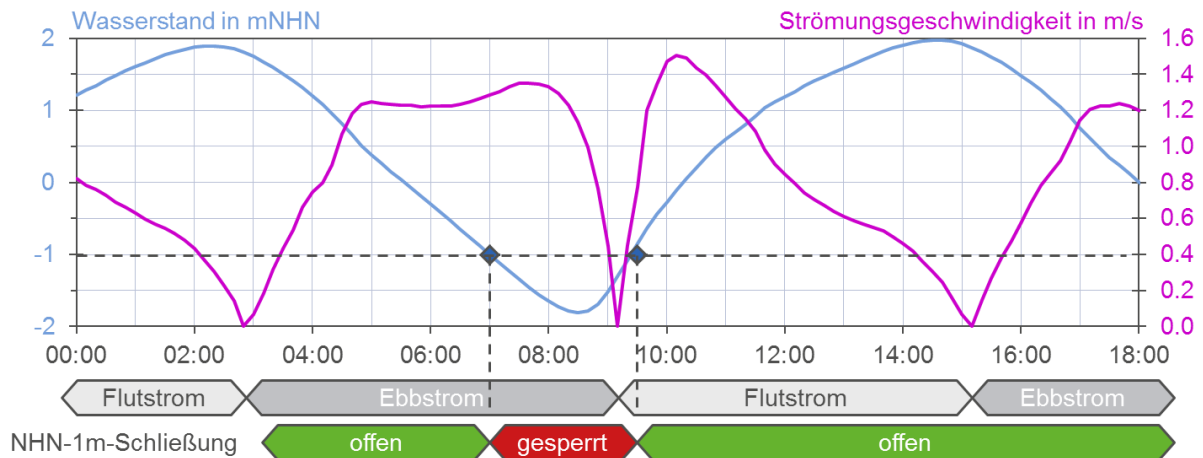


Bild 93: Skizze des zeitlichen Verlaufs der Steuerung der Tore des Emssperrwerks für die untersuchte Vollsperrung bei einem niedrigeren Wasserstand als NHN-1m. Oben in Blau eine Wasserstandsganglinie und in Rot eine Strömungsganglinie am Emssperrwerk für den Ist-Zustand. Während das Emssperrwerk geschlossen ist können sich die Ganglinien am Emssperrwerk erheblich ändern.

5.3.1 Wirkung auf die Hydrodynamik

Durch die komplette Schließung des Emssperrwerkes bei einem Wasserstand von NHN-1m im Ebbestrom wird ein weiteres Absinken des Wasserstandes stromauf des Sperrwerks verhindert (Bild 94). Der Wasserstand steigt hingegen kurz nach der Schließung des Emssperrwerks durch das nachlaufende Wasser an und weist anschließend für einen längeren Zeitraum nur geringe Veränderungen auf. Hieraus ergibt sich eine Anhebung des mittleren Tideniedrigwassers um ca. 0,8 m im Vergleich zum Ist-Zustand (Bild 96). Diese Anhebung ist etwa 40 cm geringer als durch eine dauerhafte Sohlschwelle. Stromab des Emssperrwerks führt das fehlende nachlaufende Wasser aus der Unterems zu einer Absenkung des mittleren Tideniedrigwassers. Direkt am Sperrwerk ist diese Absenkung mit ca. 60 cm am stärksten ausgeprägt. Das Tidehochwasser wird durch diese Variante kaum verändert (Bild 95). Deshalb liegen die Änderungen des Tidehubs auch in der Größenordnung der Änderungen des Tideniedrigwassers. Der Tidehub nimmt so stromauf des Emssperrwerks ab und zwischen Knock und Emssperrwerk zu (Bild 97). Aus diesen Veränderungen folgt eine Abnahme des Tidestromvolumens in der Unterems.

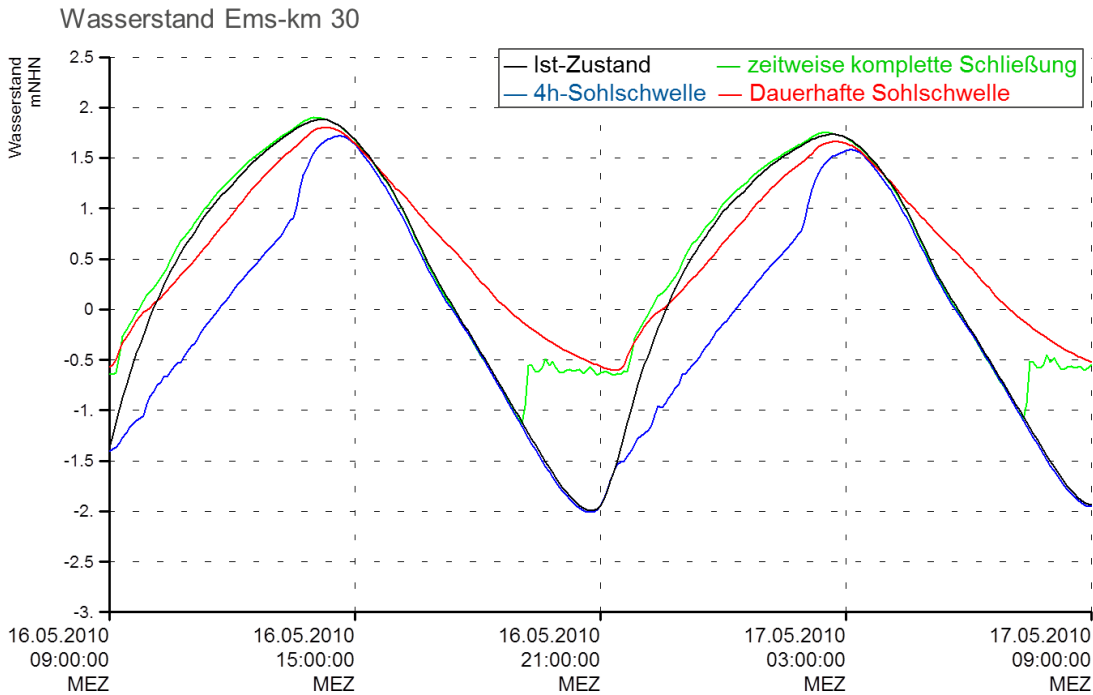
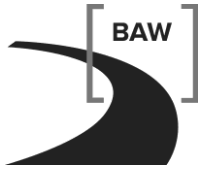


Bild 94: Wasserstandszeitreihe bei Ems-km 30 (Fahrrinnenmitte) vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün), die 4h-Sohlschwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

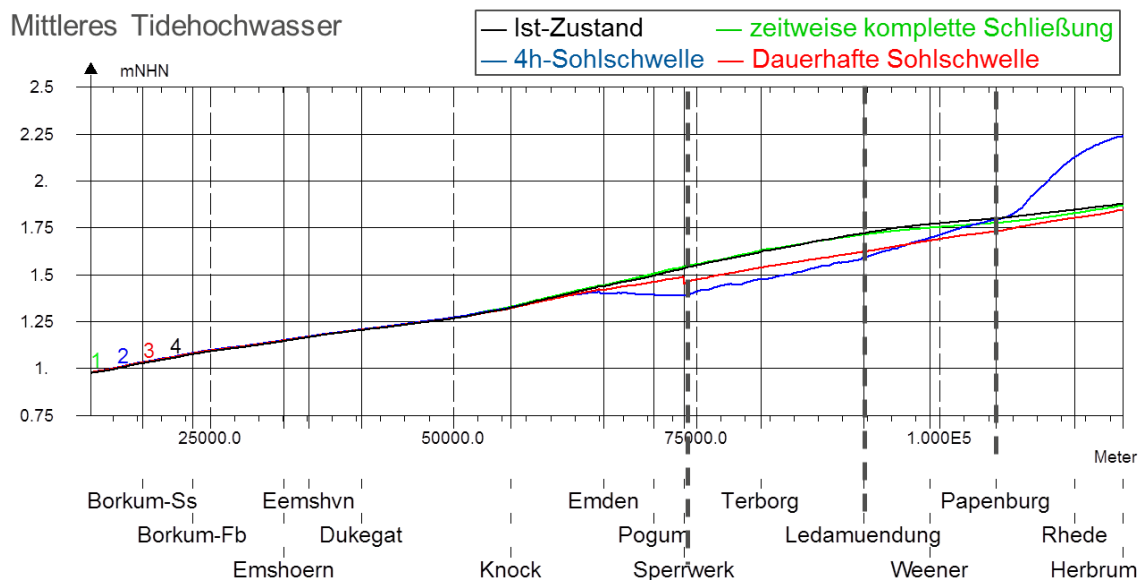


Bild 95: Mittleres Tidehochwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für die komplette Schließung des Emssperrwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau).

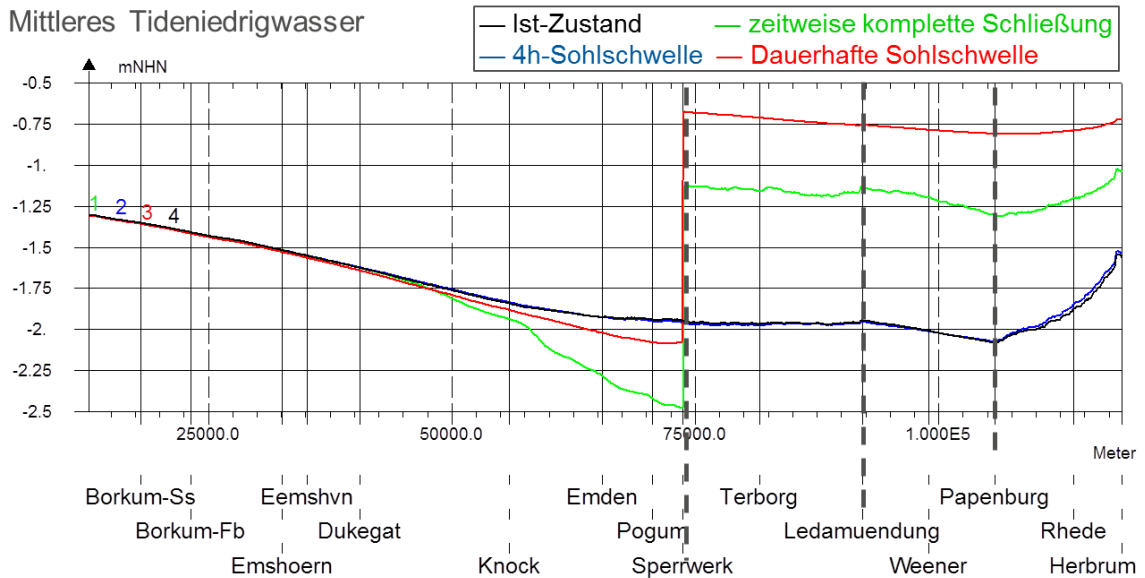


Bild 96: Mittleres Tideniedrigwasser in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für die komplette Schließung des Emssperrwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau).

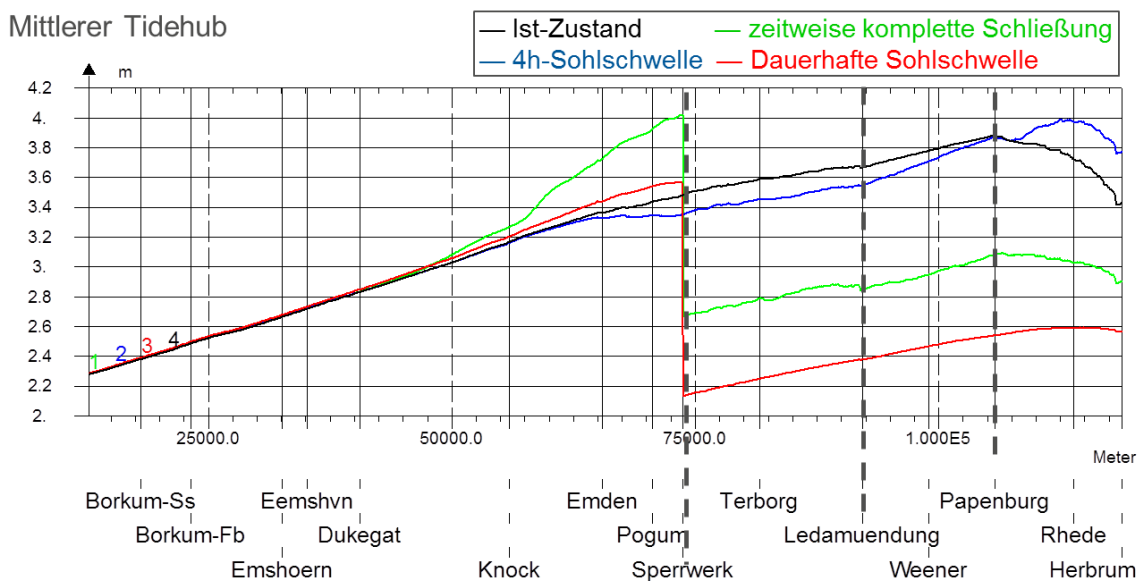


Bild 97: Mittlerer Tidehub in Fahrrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für die komplette Schließung des Emssperrwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau).

Bei der Berechnung der Tidekennwerte der Strömung wird die Eintrittszeit von Flut- und Ebbestrom über den Richtungswechsel der Strömung bestimmt. Voraussetzung für eine erfolgreiche Bestimmung der Tidekennwerte der Strömung ist, dass jede Tide genau zwei Strömungskenterungen hat, eine nach dem Flutstrom und eine zweite nach dem Ebbestrom. Im Fall der zeitweise kompletten Schließung ist diese Voraussetzung (in weiten Bereichen

der Unterems) nicht erfüllt (Bild 98). Eine Analyse der betroffenen Parameter erfolgt deshalb beispielhaft anhand von Zeitreihen über zwei Tiden.

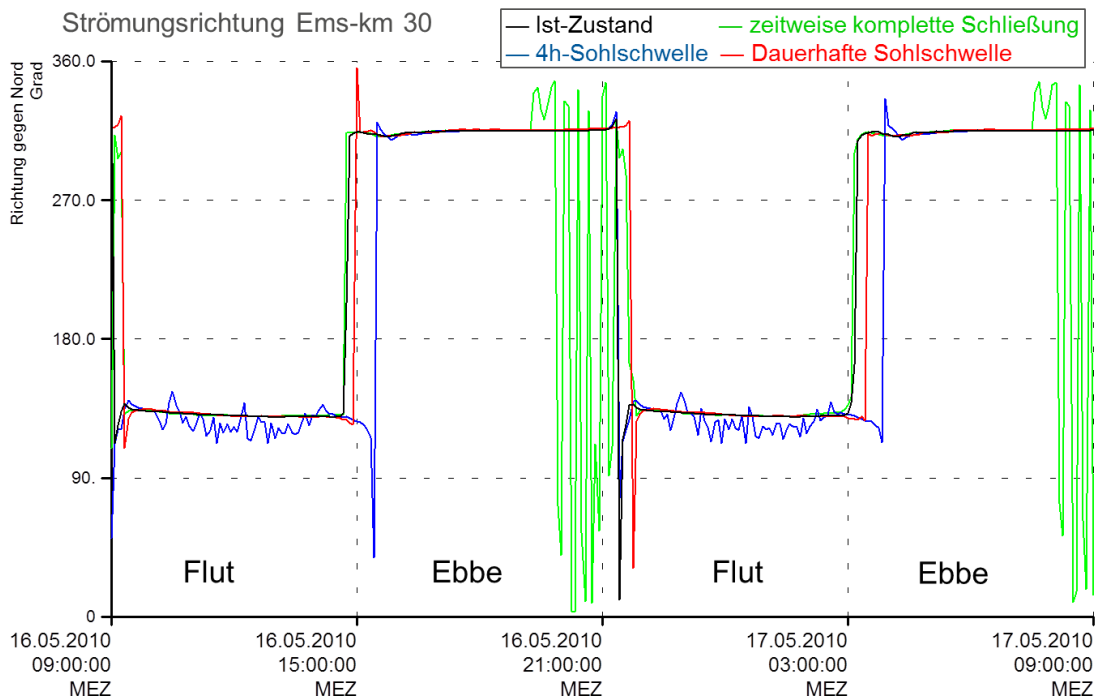


Bild 98: Strömungsrichtungszeitreihe bei Ems-km 30 (Fahrrinnenmitte) vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün), die 4h-Sohlschwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

Die Strömungsgeschwindigkeiten werden bei Knock durch die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks kaum verändert. Im Flutstrom ist eine leichte Erhöhung des Strömungsmaximums und eine geringe Verringerung der Geschwindigkeiten nach diesem Maximum erkennbar (Bild 99). Am Ems-km 15, 30, und 40 werden die Strömungsgeschwindigkeiten im Flutstrom im Vergleich zum Ist-Zustand verringert. Im ersten Teil des Ebbestroms liegen die Strömungsgeschwindigkeiten an allen drei Orten etwa auf dem Niveau des Ist-Zustandes, bei Ems-km 30 ist eine geringe Zunahme des Ebbestrommaximums sichtbar. Die Ebbestromgeschwindigkeiten sinken an allen drei Orten deutlich früher als im Ist-Zustand gegen Null voraus vor allem am Ems-km 15 und 30 eine längere Phase sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten folgt. Diese wird durch die geringen Wasserstandsänderungen um Tideniedrigwasser hervorgerufen (Bild 94).

Aus den Bildern Bild 99 bis Bild 102 ist zudem erkennbar, dass sich die Eintrittszeit der Flutstromkenterung im Gegensatz zur dauerhaften Sohlschwelle und zur 4h-Sohlschwelle in der Unterems nicht nach hinten verschiebt, sondern nahezu mit dem Ist-Zustand übereinstimmt. Bei Knock tritt der Ebbestromkenterpunkt ebenfalls fast gleichzeitig mit dem Ist-Zustand ein, so dass wir an diesem Ort durch die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks

keine Veränderung der Ebbe- und Flutstromdauer beobachten. Am Ems-km 40 hingegen tritt der Ebbestromkenterpunkt früher ein, was einer Verlängerung der Flutstromdauer und einer Verkürzung der Ebbestromdauer entspricht. Stromauf des Sperrwerks, hier beispielhaft dargestellt für Ems-km 15 und 30, ist die Phase sehr geringer Wasserstandsänderungen und der daraus folgenden geringen Strömungsgeschwindigkeiten um Tideniedrigwasser nicht eindeutig einer Strömungsrichtung zuzuordnen. Dies kann als eine Verkürzung der Ebbestromdauer bei gleichzeitiger kaum veränderter Flutstromdauer interpretiert werden.

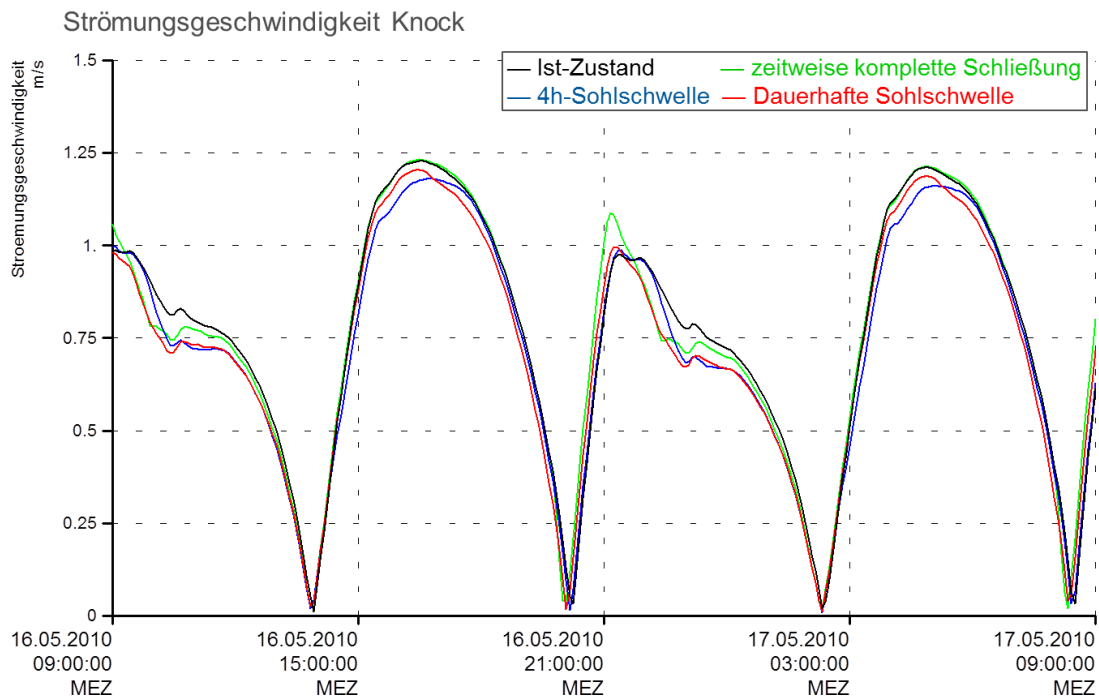


Bild 99: Strömungsgeschwindigkeitszeitreihe bei Knock vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün), die 4h-Sohlchwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlchwelle (Rot).

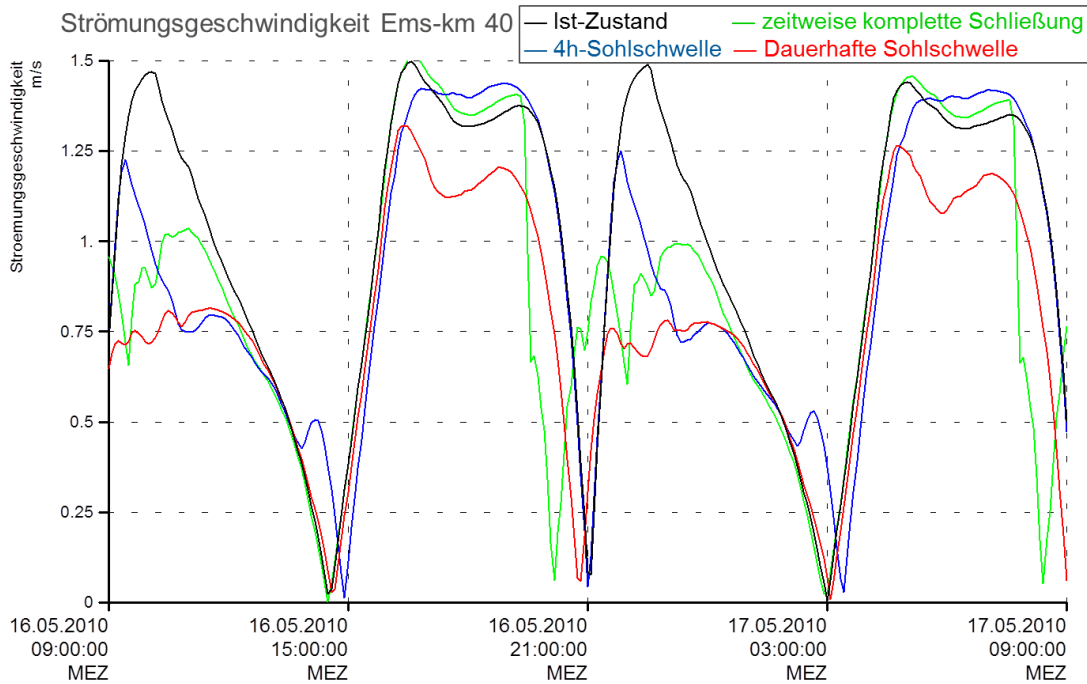


Bild 100: Strömungsgeschwindigkeitszeitreihe bei Ems-km 40 (Fahrrinnenmitte) vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün), die 4h-Sohlschwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

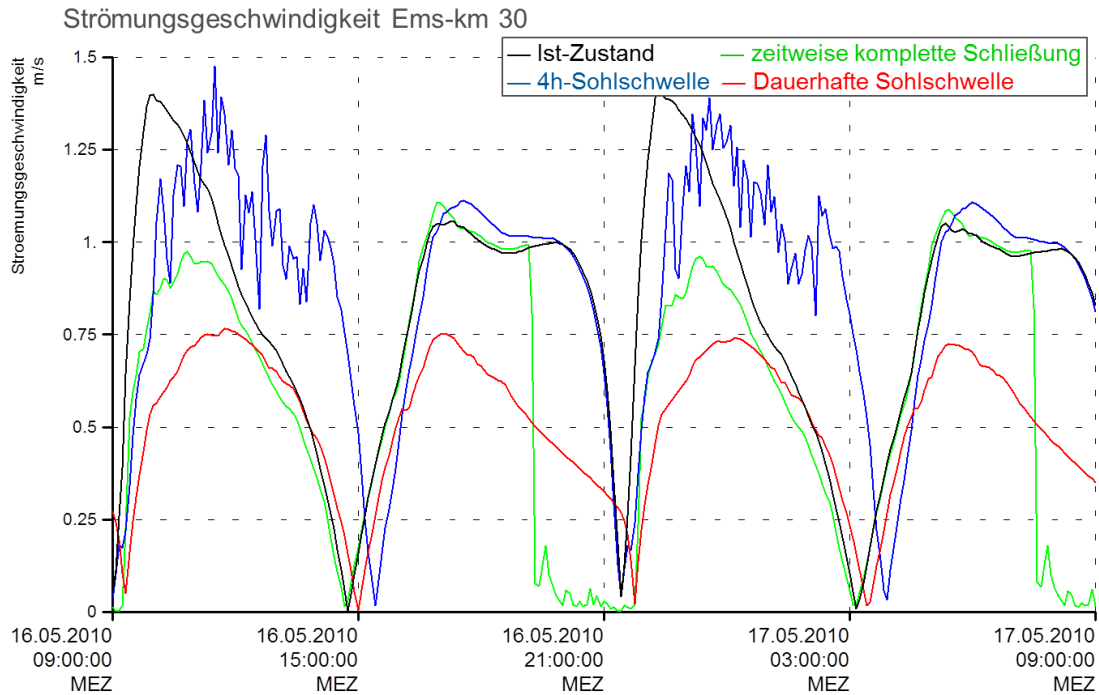


Bild 101: Strömungsgeschwindigkeitszeitreihe bei Ems-km 30 (Fahrrinnenmitte) vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperwerkes (Grün), die 4h-Sohlschwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

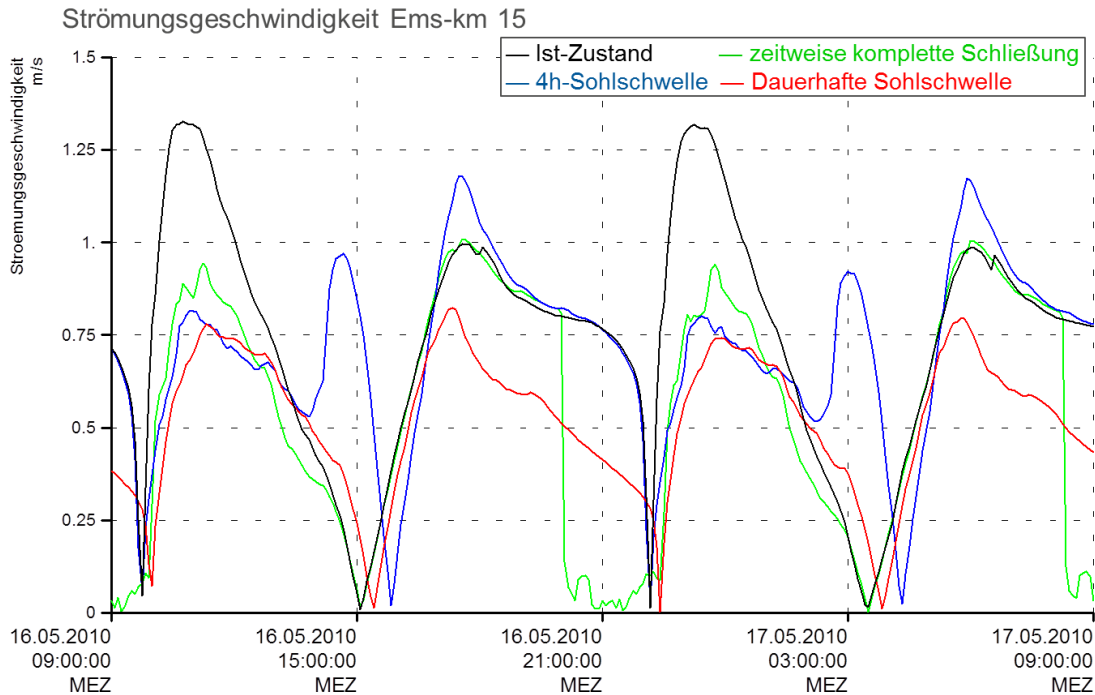


Bild 102: Strömungsgeschwindigkeitszeitreihe bei Ems-km 15 (Fahrrinnenmitte) vom 16.05.2010 bis zum 17.05.2010 für den Ist-Zustand (Schwarz), die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün), die 4h-Sohlschwelle (Blau) und die dauerhafte Sohlschwelle (Rot).

5.3.2 Wirkung auf den Salzgehalt

Der maximale Salzgehalt wird durch die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks in der Unterems im Vergleich zum Ist-Zustand verringert (Bild 103). Diese Reduzierung wird durch die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten im Flutstrom bei nahezu unveränderter Flutstromdauer und durch die Veränderungen des Tidemittelwassers hervorgerufen. Der sprunghafte Anstieg des Tidemittelwassers am Emssperrwerk bewirkt wie bei der dauerhaften Sohlschwelle eine geringere Salzintrusion von der Außenems in die Unterems. Auch die im Vergleich zum Ist-Zustand größere Steigung des Tidemittelwassers führt aufgrund des höheren mittleren barotropen Druckgradienten zu einem verringerten stromaufgerichteten Salztransport mit der baroklinen Zirkulation (Bild 104).

Die Abnahme des Salzgehalts ist geringer als bei einer dauerhaften Sohlschwelle, was wiederum durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks erklärt werden kann.

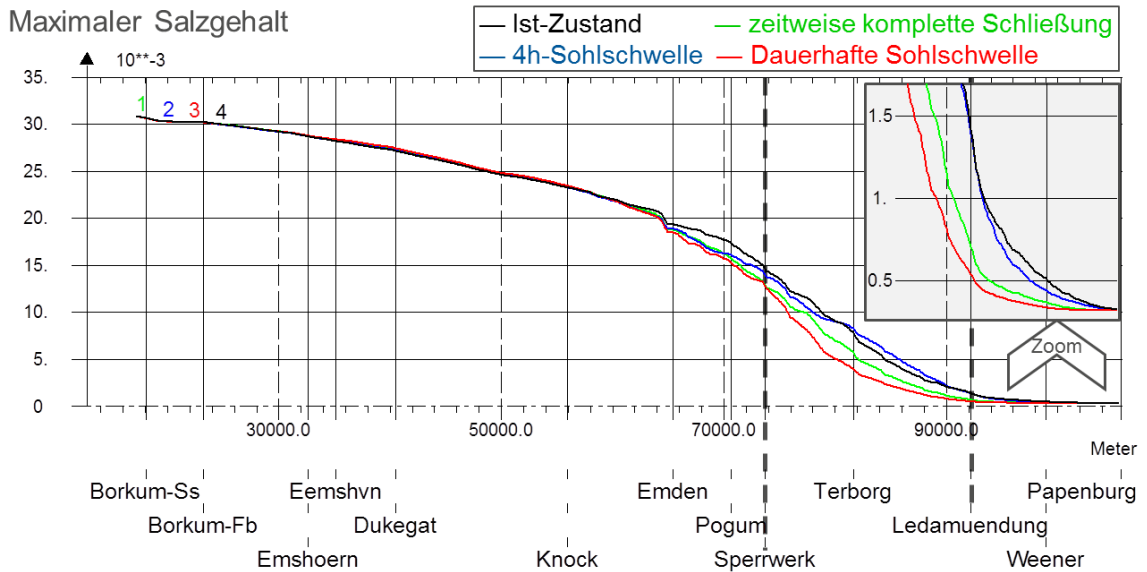


Bild 103: Maximaler Salzgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für die komplette Schließung des Emssperwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau) (Querprofil-Mittelung).

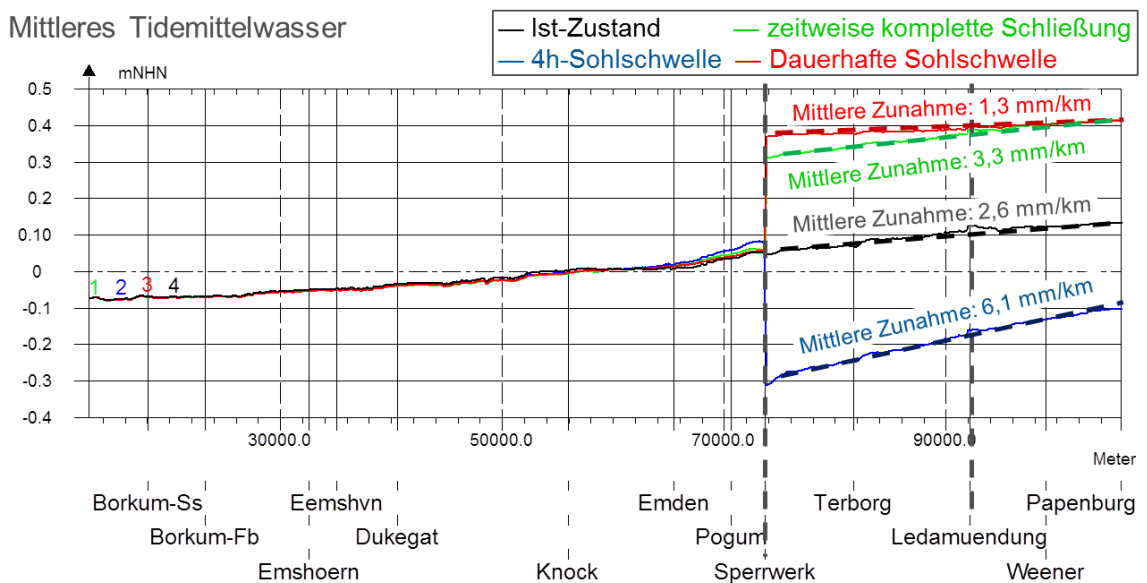
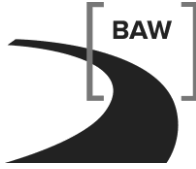


Bild 104: Mittleres Tidemittelwasser in Fahrinnenmitte von Borkum bis Herbrum für die komplette Schließung des Emssperwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau). Für den Abschnitt Ems-Kilometer 30 (stromauf Emssperwerk) bis Ems-Kilometer 0 (Papenburg) ist eine lineare Regression durchgeführt worden: Die Steigungen dieser Geraden sind angegeben.



5.3.3 Wirkung auf den Schwebstoff-Haushalt

In der Außenems sind nur sehr geringe Unterschiede im mittleren und maximalen Schwebstoffgehalt feststellbar (Bild 105 und Bild 106). Durch die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks wird hier der Schwebstoffgehalt im Vergleich zum Ist-Zustand verringert. Der Schwebstoffgehalt ist jedoch größer als bei der dauerhaften Sohlschwelle und bei der 4h-Sohlschwelle. Etwa ab Knock tritt eine Erhöhung sowohl des mittleren als auch des maximalen Schwebstoffgehalts im Vergleich zum Ist-Zustand auf. Wie bei den verschiedenen Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom spielt hierbei eine veränderte Verschiebung des Trübungsmaximums eine Rolle (vergl. Kapitel 5.2.2.3). Das Trübungsmaximum beginnt aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten im Flutstrom weiter seewärts als im Ist-Zustand (Bild 108). Des Weiteren sind auch hier die geänderten Schwebstofftransporte wichtig. Stromauf des Emssperrwerks ist der Schwebstoffgehalt im Vergleich zum Ist-Zustand verringert, was durch die geringen Strömungsgeschwindigkeiten bedingt ist. Diese Verringerung fällt beim maximalen Schwebstoffgehalt größer aus als beim mittleren Schwebstoffgehalt.

Eine zeitweise komplette Schließung im Ebbestrom führt in der Unterems zu einer Reduzierung des Tidestromvolumens. In Kombination mit einem reduzierten Schwebstoffgehalt tritt so prinzipiell ein geringerer Schwebstofftransport auf. Weder im Ebbe- noch im Flutstrom werden die Strömungsgeschwindigkeiten erhöht, so dass eine Reduzierung des Schwebstoffgehalts und somit auch des Transports nicht nur insgesamt, sondern auch während beider Tidephasen zu erwarten ist. Insgesamt kann so ab Knock ein ebbestrom-dominanter Schwebstofftransport erzielt werden (Bild 107), was zeigt, dass die Reduzierung des Transportes im Flutstrom größer ausfällt als im Ebbestrom. Dies ist eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand und zur dauerhaften Sohlschwelle. In diesem Bereich werden so mehr Schwebstoffe mit dem Ebbestrom stromab als mit dem Flutstrom stromauf transportiert. Diese Veränderung unterstützt auch die seewärtige Verschiebung der Trübungszone. Die Schwebstofftransportbilanz der 4h-Sohlschwelle wird durch die hier untersuchte Variante jedoch nicht erreicht.

In der Außenems sind nur sehr geringe Veränderungen des residuellen Schwebstoff-Transports erkennbar, der flutstrom-dominante Schwebstoff-Transport bleibt erhalten und wird tendenziell verstärkt.

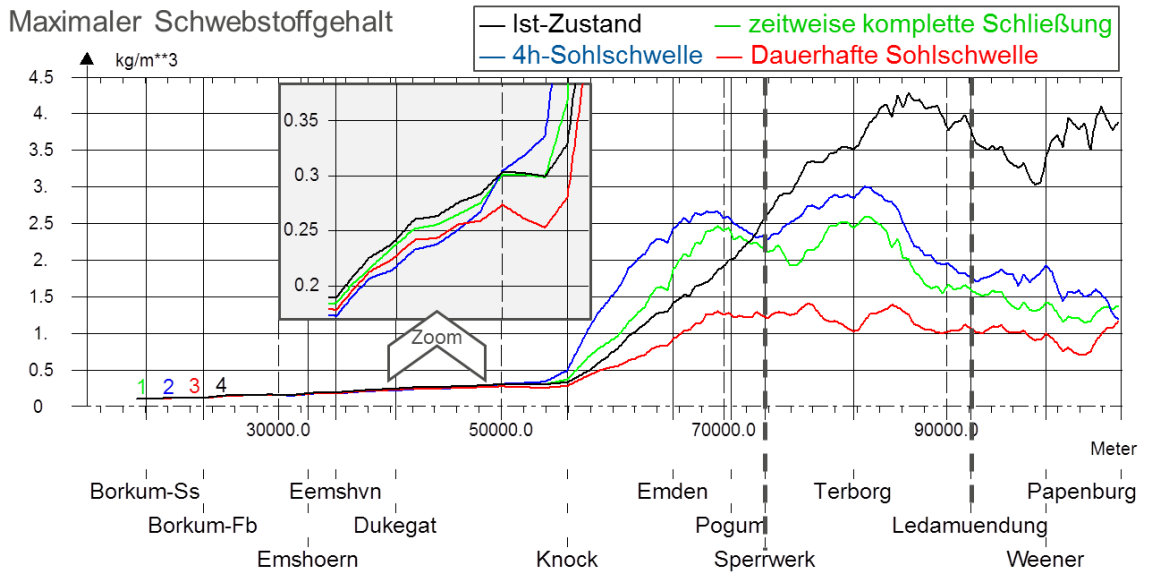


Bild 105: Maximaler Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für die komplette Schließung des Emssperwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau) (Querprofil-Mittelung).

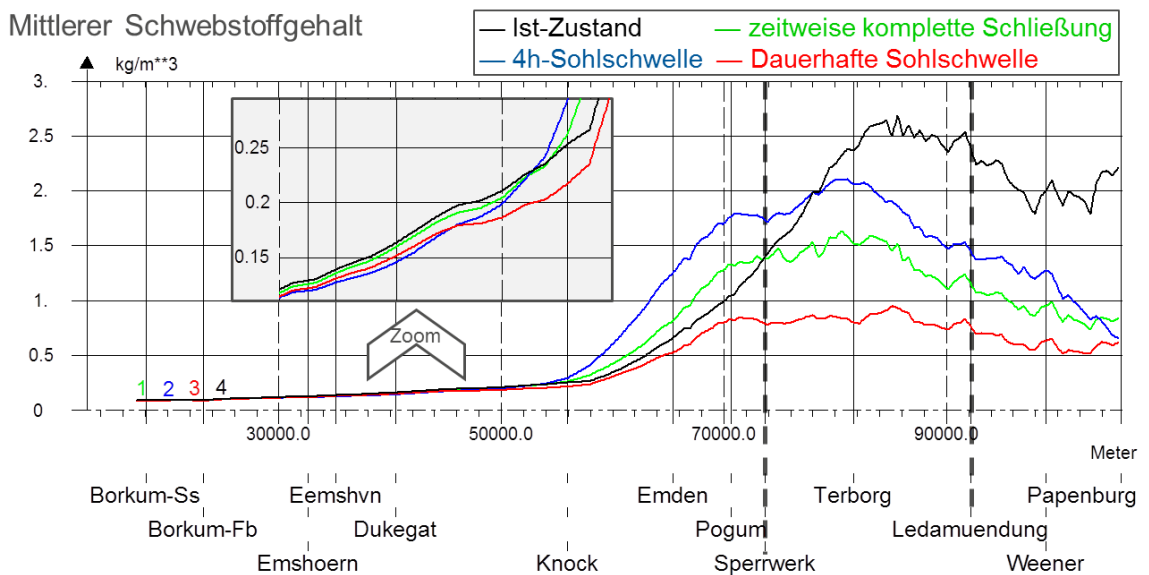
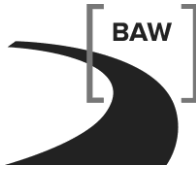


Bild 106: Mittlerer Schwebstoffgehalt im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für die komplette Schließung des Emssperwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau) (Querprofil-Mittelung).



Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport

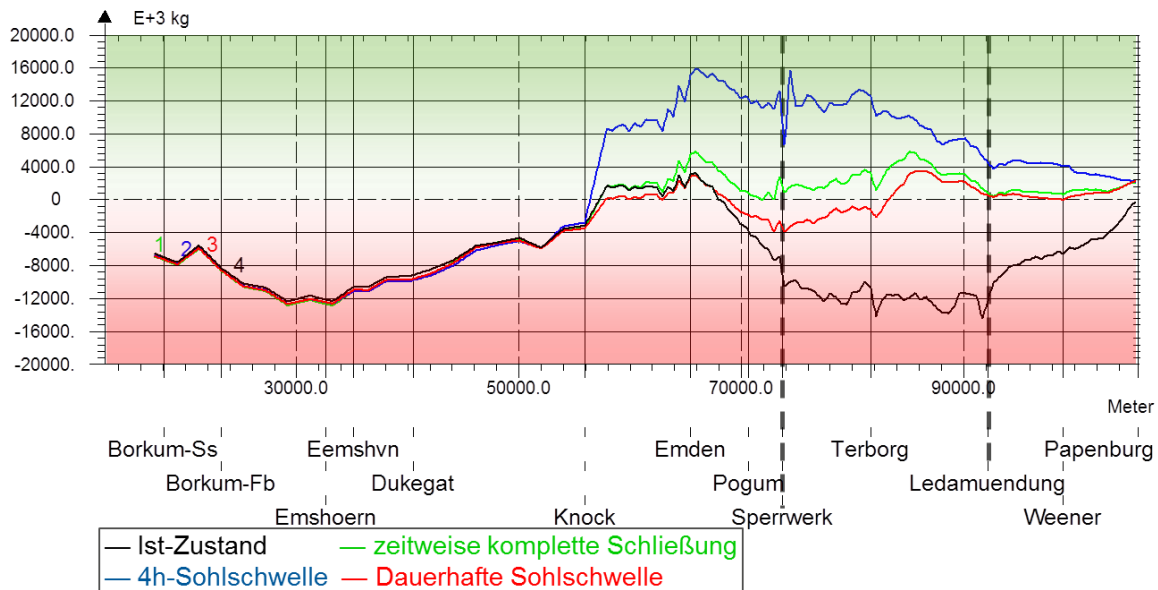


Bild 107: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für die komplette Schließung des Emssperrwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau) (Querprofil-Integration). Negative 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.

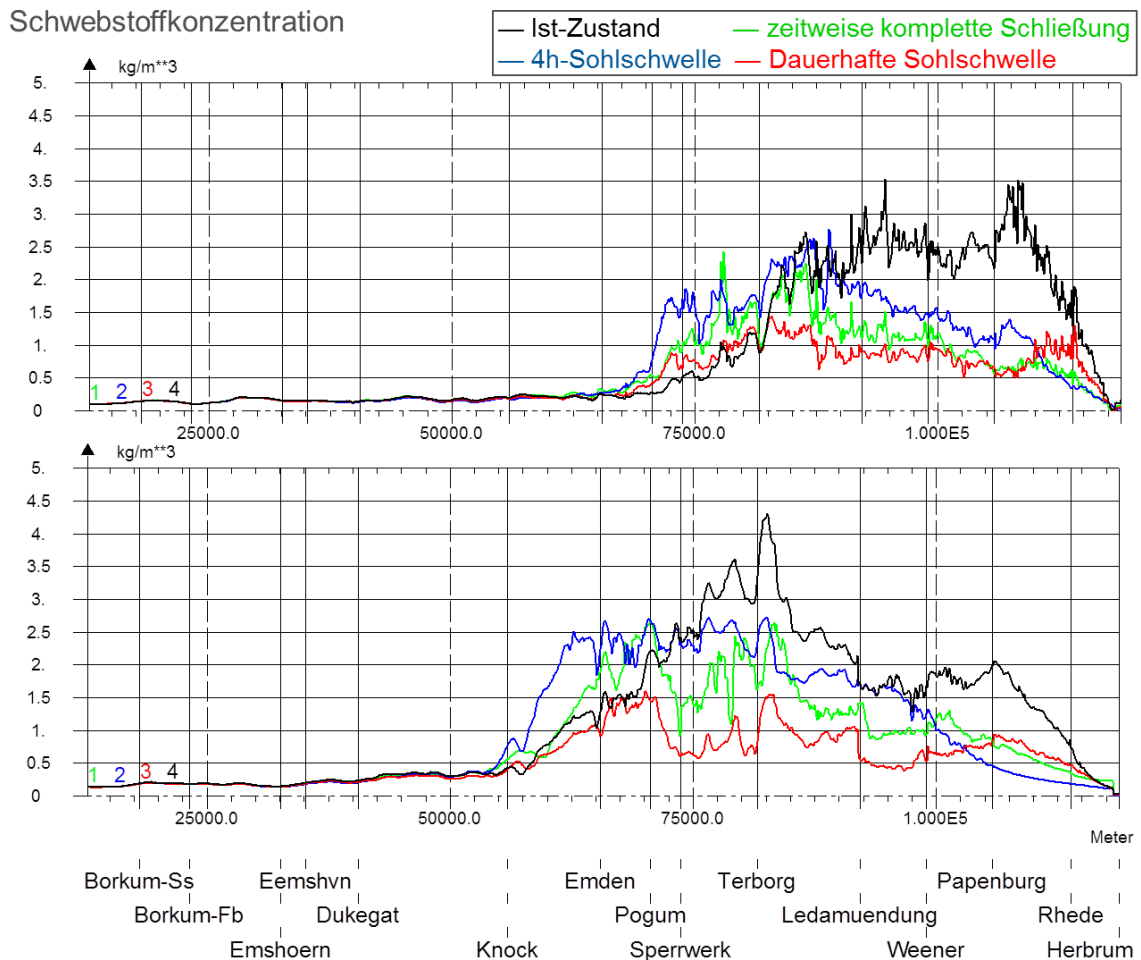
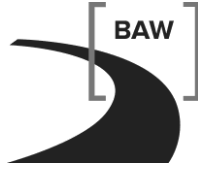


Bild 108: Momentaufnahmen des Schwebstoffgehalts im Längsschnitt von Borkum bis Herbrum für die komplette Schließung des Emssperrwerkes (Grün) im Vergleich zum Ist-Zustand (Schwarz), der dauerhaften Sohlschwelle (Rot) und der 4h-Sohlschwelle (Blau). Oben: Flutstromkenterpunkt am Emssperrwerk (16.05.2010 15:35); Unten: Ebbestromkenterpunkt am Emssperrwerk (16.05.2010 21:15).

5.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Eine zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerkes beeinflusst die Hydrodynamik in der Unterems durch eine Reduzierung des Tidestromvolumens und durch eine Verkürzung der Ebbestromdauer. Bei kaum veränderter Flutstromdauer in der Unterems führt das reduzierte Volumen zu geringeren Flutstromgeschwindigkeiten. Zur Ebbestromkenterung tritt eine längere Phase sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten auf, welche nicht eindeutig einer Strömungsrichtung zugeordnet und somit als eine Verkürzung der Ebbestromdauer angesehen werden kann. In Kombination mit dem reduzierten Ebbestromvolumen bleiben so die Ebbestromgeschwindigkeiten etwa auf dem Niveau des Ist-Zustandes. Die hydrodynamischen Veränderungen führen zu einer verminderten Salzintrusion und zu einem geringen Schwebstoffgehalt in der Unterems. Stromauf von Knock ergibt sich ein ebbestrom-



dominanter Schwebstofftransport, was eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand und zur dauerhaften Sohlschwelle darstellt.

6 Annahmen und Einschränkungen

Die BAW hat im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts „Maßnahmen zur Reduzierung des Schwebstofftransportes in die Unterems“ (BAW, 2015) in Kapitel 8 Fehlerquellen bei der Nutzung von HN-Modellen benannt. Diese sind auch hier gültig:

- Fehler im mathematischen Modell
- Numerische Fehler durch räumliche und zeitliche Diskretisierung
- Datenfehler bei Peildaten und Messungen, die sich auf die Geometrie und die Anfangs- und Randwerte auswirken

Auf für die Interpretation wichtige Aspekte soll näher eingegangen werden:

- Während des Betriebs der flexiblen Sohlschwelle treten aufgrund der großen Querschnittseinengung hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Inwieweit die vom Modell berechneten den tatsächlich auftretenden Geschwindigkeiten entsprechen, kann nur anhand von Messungen mit Überströmung des teilweise aus dem Drempel herausgedrehten Drehsegmentverschlusses in der Hauptschifffahrtsöffnung geklärt werden.
- Da der Salzgehalt sehr träge auf hydrodynamische Änderungen reagiert, kann ein Simulationszeitraum von vier Wochen zur abschließenden Beurteilung der baroklinen Zirkulation und somit der Salzintrusion evtl. nicht ausreichen. Insbesondere die Auswirkungen der großen Änderungen des Tidemittelwassers könnten möglicherweise nicht vollständig erfasst worden sein. Zudem ist bei einem relativ kurzen Simulationszeitraum der Anfangszustand des Salzgehalts aufgrund dieser Trägheit sehr entscheidend. Beides muss durch weitergehende Untersuchungen mit einem längeren Simulationszeitraum überprüft werden.
- Die Schwebstoffdynamik des Emsästuars ist sehr komplex, die im Emders Fahrwasser und der Unterems vorkommenden hochkonzentrierten Suspensionen und den dynamischen Übergang zum Flüssigschlick kann das Modell nicht simulieren. Dies muss bei der Interpretation der Modellergebnisse berücksichtigt werden, da dieser Mechanismus entscheidend für die Akkumulation von Sedimenten ist, die in Realität stärker auftritt als im Modell (BAW, 2012).
- Weitere die Schwebstoffdynamik betreffende Annahmen sind in der Festlegung von drei Sedimentfraktionen (Grobsand, Feinsand, Schluff), der Anfangsverteilung dieser Fraktionen und der Mächtigkeit des erodierbaren Bodens (einheitlich 25 cm) zu finden. Die Anfangsverteilung wird überwiegend im Emders Fahrwasser, wo im Modell der Übergang vom groben Material der Außenems zum feinen Material der Unterems stattfindet, eine wichtige Rolle spielen. Eine Beeinflussung der Sedimentdynamik

durch die Mächtigkeit des erodieren Bodens ist vor allem in Bereichen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, also in der Nähe des Emssperrwerks, zu erwarten.

- Des Weiteren sind die Aussagen zur Veränderung des Schwebstoffgehalts und – transports nur für einen relativ kurzen Zeitraum gültig. Der langfristige Einfluss der verschiedenen Varianten einer flexiblen und der dauerhaften Sohlschwelle und der zeitweisen Schließung des Emssperrwerks muss in weiteren Analysen mit längeren Simulationszeiträumen untersucht werden. Beispielsweise ist durch den geänderten Schwebstofftransport bei einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom langfristig mit abnehmenden Schwebstoffgehalten in der Unterems und im Emders Fahrwasser und somit auch wiederum mit geringen Transportmengen zu rechnen.
- Die getroffenen Aussagen basieren auf Szenarien. So ist beispielsweise der Abfluss der Ems in Herbrum konstant. Die Wirkung der verschiedenen Szenarien bei anderen Ausgangsbedingungen, wie andere Abflussverhältnisse, muss noch untersucht werden.

Die Kalibrierung und Validierung des Modells zeigt, dass die Hydrodynamik vom Modell zufriedenstellend wiedergegeben wird (BAW, 2012) und die grundsätzliche Beeinflussung der verschiedenen untersuchten Varianten auf die Salzintrusion und die Schwebstoffdynamik kann durch die modellierten hydrodynamischen Reaktionen auf die Szenarien erklärt werden. Die quantitativen Ergebnisse und räumlichen Variationen sind jedoch streng genommen nur für die gewählten Anfangs- und Randbedingungen gültig und sollten nur mit Berücksichtigung der genannten Annahmen und Einschränkungen betrachtet werden.

7 Anpassungs- und Widerstandsfähigkeit gegen Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg

Die verschiedenen Varianten einer flexiblen Sohlschwelle und die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks sind aus technischer Sicht reversibel, d.h., dass sie ein- und ausgeschaltet werden können (IMS, 2014). 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 flexible Sohlschwelle und die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks die derzeitigen Funktionen des Emssperrwerks nicht negativ beeinträchtigen. Auch in Situationen mit hohem Abfluss können diese Varianten ausgeschaltet werden, um den dann gegebenen hohen natürlichen Abfluss nicht zu behindern.

Die dauerhafte Sohlschwelle ist im Gegensatz zu der flexiblen Sohlschwelle und zur zeitweisen kompletten Schließung des Emssperrwerks nicht reversibel, weil für die Umsetzung der dauerhaften Sohlschwelle u.a. auch Steinschüttungen und Spundwände vorgesehen sind (IMS/IRS, 2009 und IMS, 2014). Das heißt, dass die dauerhafte Sohlschwelle in einer Situa-

tion mit hohem Oberwasserzufluss nicht ausgeschaltet werden kann und deshalb den Abfluss behindert.

Der Einfluss einer dauerhaften Sohlschwelle während einer Sturmflut wurde im Rahmen des Aktionsprogramms des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems anhand der 5. Allerheiligenflut untersucht (BAW, 2009). Hierbei wurde die dauerhafte Sohlschwelle, abweichend zu diesem Bericht, durch dauerhaft geschlossene HSÖ, BSÖ und NÖ1 umgesetzt. Bei der NÖ2 bis NÖ5 befindet sich unverändert zu diesem Bericht eine Sohlschwelle mit einer Höhe von -1,50m NHN. Bei der untersuchten Sturmflut führt die dauerhafte Sohlschwelle stromauf des Sperrwerks zu einer Absenkung der Sturmflutscheitelwasserstände um 20 bis 35 cm im Vergleich zum Ist-Zustand. Zwischen Gandersum und Dukegat werden die Scheitelwasserstände um bis 4 cm erhöht, in der Außenems sind die Änderungen kleiner als 1 cm (Bild 109). Diese Aussagen gelten unabhängig davon, ob das Emssperrwerk während der Sturmflut bei einem Wasserstand von +3,5m NHN geschlossen wird oder offen bleibt. (BAW, 2009).

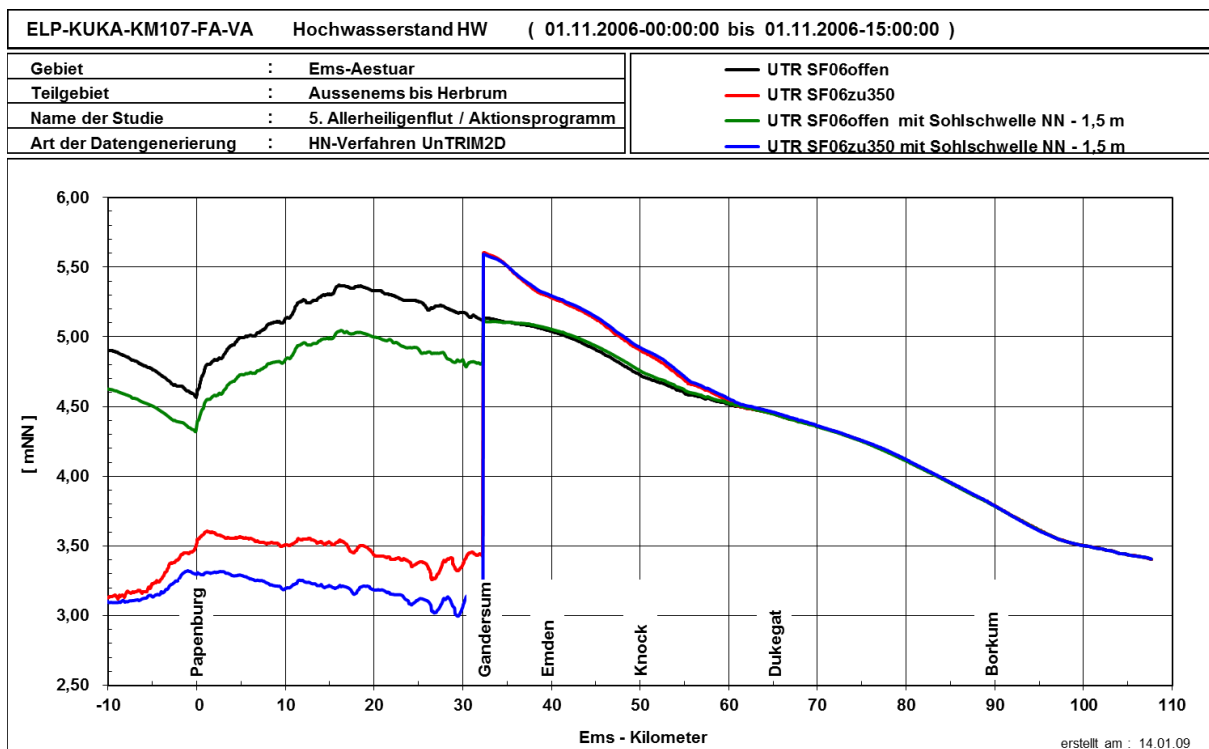


Bild 109: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario SF06 entlang des Längsprofils in der Ems von Herbrum bis Hubertgat. (Quelle: BAW, 2009).

Im Rahmen des KLIWAS Projekts wurde die Wirksamkeit einer dauerhaften Sohlschwelle bei einem Meeresspiegelanstieg von 80cm und lang anhaltendem niedrigen Oberwasserzufluss untersucht. Die Sohlschwelle wurde hier modelltechnisch wie für die Sturmflutuntersuchungen mit dauerhaft geschlossener HSÖ, BSÖ und NÖ1 umgesetzt. Auch unter diesen Bedingungen bewirkt eine dauerhafte Sohlschwelle eine Verminderung des stromaufgerichteten

Schwebstofftransports und der Salzintrusion und wird daher „für mögliche zukünftige Klimaverhältnisse als geeignet eingestuft“ (Seiffert et al. 2014).

Wenn die Sohlschwelle flexibel gemäß IMS (2014) umgesetzt wird, dann ist prinzipiell auch eine Anpassung an einen geänderten Meeresspiegel möglich. Untersuchungen zur Wirksamkeit der verschiedenen Varianten einer flexiblen Sohlschwelle und der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks bei einem Meeresspiegelanstieg und geänderten Abflussverhältnissen sind aber noch nicht vorhanden

8 Vergleich und Ausblick

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.

Die dauerhafte Sohlschwelle ist eine Möglichkeit, den Schwebstoff-Haushalt der Unterems positiv zu beeinflussen. Der Schwebstoffgehalt wird verringert, ebenso der residuelle Stromauf-Transport, streckenweise auch gekehrt, was eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand ist. Nachteilig ist, dass die ununterbrochene Querschnittseinengung zu einer eingeschränkten ökologischen Durchgängigkeit führt. Weiterhin wäre der Bau einer Schleuse für die Schifffahrt erforderlich (BAW, 2015), weil die Sohlschwelle ohne Schleuse für Schiffe unpassierbar ist.

Es sind deshalb weitere Varianten untersucht worden, die eine höhere Durchgängigkeit (auch für den Schiffsverkehr) aufweisen, als die dauerhafte Sohlschwelle. Der Vergleich dieser Varianten mit dem Ist-Zustand zeigt, dass eine dauerhafte Sohlschwelle, verschiedene Varianten einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom und die zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser zu positiven Veränderungen der Schwebstoffdynamik in der Unterems führen (Bild 110). Die größte Wirkung kann durch eine flexible Sohlschwelle im Flutstrom erzielt werden, welche für eine Dauer von 4 Stunden aktiv ist.

Die in diesem Zusammenhang untersuchte Variation der Dauer, in der eine flexible Sohlschwelle im Flutstrom aktiv ist, hat gezeigt, dass die optimale Transportbilanz durch die Minimierung der Abnahme des Tidevolumens bei gleichzeitiger Maximierung der Verlängerung der Flutstromdauer erzielt wird. Die flexible Sohlschwelle im Flutstrom sollte einerseits nicht während des gesamten Flutstroms aktiv sein, um eine zu starke Reduzierung des Tidestromvolumens zu vermeiden und andererseits nicht zu kurz aktiv sein, um eine ausrei-

chende Verlängerung der Flutstromdauer zu erzielen. Bei den hier untersuchten Varianten besitzt die flexible Sohlschwelle über eine Dauer von 4 Stunden den größten positiven Effekt auf den residuellen Schwebstofftransport. Die gewählte Sohlschwelle ist so ausgelegt, dass sie ohne Umbau des Emssperrwerks prinzipiell realisierbar ist, aber es stellen sich hierbei im Sohlschwellenbetrieb hohe Strömungsgeschwindigkeiten an der HSÖ sowie stromab davon ein. Die Standsicherheit des Emssperrwerks ist für den Lastfall des Sohlschwellenbetriebs daher noch nachzuweisen. Zur Vermeidung von zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten müsste die flexible Sohlschwelle ggf. verbreitert werden. Dies bedeutet, dass ein Umbau oder ein ergänzender Bau am Emssperrwerk notwendig wäre. Es ist zu erwarten, dass eine breitere flexible Sohlschwelle zu einem veränderten residuellen Schwebstofftransport führt und dass ggf. die optimale Dauer des Sohlschwellenbetriebs von den hier erzielten Ergebnissen abweicht. Auch die Belange des Schiffsverkehrs müssen bei der Analyse des Optimierungspotentials der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom beachtet werden. In diesem Zusammenhang steht die Suche nach einem optimierten Setup einer flexiblen Sohlschwelle, welche bei einer möglichst geringen aktiven Dauer zu ähnlichen Resultaten führt.

Mittlerer residueller Schwebstoff-Transport

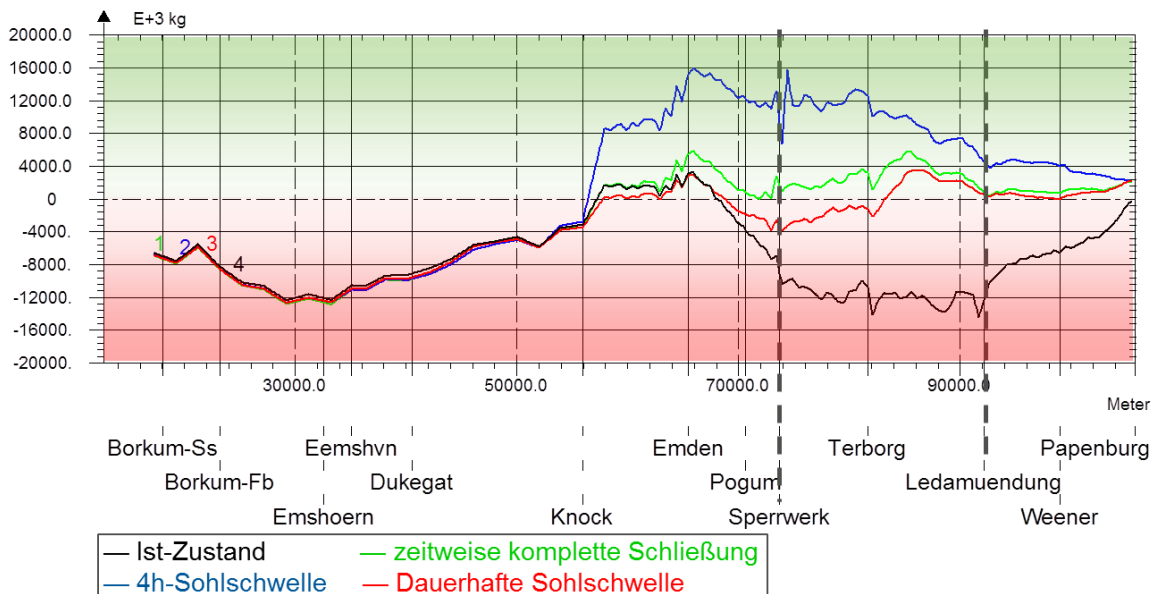
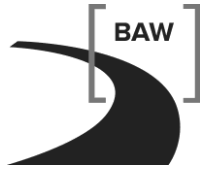


Bild 110: Mittlerer advektiver residueller Schwebstoff-Transport im Längsschnitt von Borkum bis Papenburg für den Ist-Zustände (Schwarz) und die drei Varianten dauerhafte Sohlschwelle (Rot), 4h-Sohlschwelle (Blau) und zeitweise komplette Schließung des Emssperrwerks (Grün) (Querprofil-Integration). Negative 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 der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks um Tideniedrigwasser ist eine Verkürzung der Ebbestromdauer bei kaum veränderter Flutstromdauer entscheidend für die geänderte Sedimentdynamik. Sich kaum verändernde Wasserstände und somit sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten zur Ebbestromkenterung zusammen mit einem geringeren Tidestromvolumen führen zu abnehmenden Flutstrom- und nahezu unveränderten Ebbestromgeschwindigkeiten und im Resultat zu einem ebbestrom-dominanten Schwebstofftransport in der Unterems und im Emden Fahrwasser. Die 4h-Sohlschwelle im Flutstrom führt im Gegensatz zu dieser Variante neben der Verkürzung der Ebbestromdauer auch zu einer Verlängerung der Flutstromdauer und zu einer geringeren Reduzierung des Tidestromvolumens, was insgesamt ein besseres Verhältnis der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten und somit eine bessere Schwebstofftransportbilanz in der Unterems zur Folge hat. Wie die flexible Sohlschwelle in der hier untersuchten Form ist auch diese Variante ohne Umbau des Emssperrwerks realisierbar. Vorteilhaft bei dieser Variante ist die Vermeidung von sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten, wie sie bei den Varianten der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom während der Querschnittseinengung in der Nähe des Emssperrwerks auftreten. Eine interessante Weiterentwicklung der zeitweise kompletten Schließung des Emssperrwerks wäre eine Kombination mit einer Variante der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom. Dies bedingt aber auch eine verkürzte Durchgängigkeit für den Schiffsverkehr.

Die dauerhafte Sohlschwelle stellt bezüglich des Schwebstoff-Haushalts eine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand dar, aber die verbesserten Transportbilanzen der flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom und der zeitweise kompletten Schließung um Tideniedrigwasser werden nicht erreicht. Wie eine flexible Sohlschwelle im Flutstrom wird auch die dauerhafte Sohlschwelle zu einer Verspätung des Flutstromkenterpunktes führen. Da aber die dauerhafte Sohlschwelle im Gegensatz zur flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom auch im Ebbstrom den Querschnitt einengt, wird sich auch der Ebbestromkenterpunkt verspäten und die Verlängerung der Flutstromdauer fällt bei der dauerhaften Sohlschwelle geringer aus.

Neben den bereits genannten Optimierungs- und Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Varianten muss zur abschließenden Beurteilung noch deren langfristige Wirksamkeit untersucht werden. Hier ist vor allem die Entwicklung der Salzintrusion und des Schwebstoffgehalts und -transports zu betrachten. Des Weiteren muss der Frage nachgegangen werden, wo die aus der Unterems heraus transportierten Sedimente abgelagert werden. Es wird erwartet, dass der Dollart einen erhöhten Schwebstoffeintrag erfährt, weil alle untersuchten Varianten den Stromauf-Transport von Schwebstoffen in der Außenems bis zum Dollart nicht nennenswert verändert haben. Mit Blick auf den Klimawandel muss die Wirksamkeit der verschiedenen hier betrachteten Varianten bei steigendem Meeresspiegel und geänderten Abflüssen noch weiter untersucht werden.



Bundesanstalt für Wasserbau
Masterplan Ems 2050 – Ergebnisbericht
über die Wirkung einer dauerhaften und flexiblen Sohlschwelle
und eines um Tideniedrigwasser geschlossenen Emssperrwerks
BAW-Nr. B3955.03.12.10234 – April 2016

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, April 2016

9 Literaturverzeichnis

ARGE Unter-/Außenems (2012): *Flugzeuggestützte LIDAR- und MS-Datenerfassung der Unter- und Außenems 2010*. Abschlussbericht, Arbeitsgemeinschaft Inphoris GmbH und smile consult GmbH, Bajuwarenring 21, 82041 Oberhaching.

BAW (2005): *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 (2009): *Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems – Bericht zu Sturmflutuntersuchungen anhand der 5. Allerheiligenflut vom 1.11.2006* – Bericht BAW A3955 03 10143, 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.

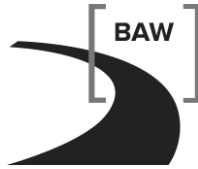
BAW (2012): *Vertiefung der Außenems bis Emden – Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang* – Gutachten BAW A3955 03 10144, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.

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.

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.

Dirks, I. (2015): *Numerische Simulation einer Wehrsteuerung des Emssperrwerks zur Verminderung des stromaufgerichteten residuellen Schwebstofftransports in der Unterems* – Masterarbeit an der Technischen Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasser-



bau, Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci mit Unterstützung der Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg.

IMS/IRS (2009): *Einengung des Durchflussquerschnitts der Ems im Bereich des Emssperrwerks* – Studie zu technischen Lösungsmöglichkeiten. Vortrag am 15.01.2009 beim WSA Emden. IMS Ingenieurgesellschaft mbH Hamburg und Ingenieurbüro Rapsch & Schubert GmbH Würzburg.

IMS (2014): *Machbarkeitsstudie Errichtung einer flexiblen und reversiblen Sohlschwelle im Bereich des Emssperrwerks* – Hg. v. IMS Ingenieurgesellschaft mbH.

Masterplan Ems 2050 (2015): Vertrag, Online verfügbar über das niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: www.umwelt.niedersachsen.de/download/93669, zuletzt geprüft am 9.2.2016.

Seiffert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Sehili, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): *Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports*. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_36/2014_3.02
URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_36_2014_3.02.pdf

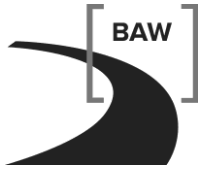
10 Glossar

Baroklin: Eine Situation, in welcher die Isobaren in einer Flüssigkeit die Flächen gleicher Dichte schneiden.

Barokliner Druckgradient: ist die Dichte des Wassers nicht konstant, so wird hierdurch das Gewicht der Wassersäule und somit auch der hydrostatische Druck beeinflusst. Bei Vorhandensein horizontaler Dichtedifferenzen stellen sich barokline Verhältnisse ein. Die Änderung des Drucks in einer konstanten Wassertiefe wird zusätzlich zur Wirkung eines Wasserspiegelgefälles auch durch die horizontalen Dichtedifferenzen beeinflusst.

Barotrop: Eine Situation, in welcher die Isobaren in einer Flüssigkeit parallel zu den Flächen gleicher Dichte verlaufen.

Barotroper Druckgradient: Der hydrostatische Druck in einer bestimmten Wassertiefe wird durch das Gewicht der darüber befindlichen Flüssigkeit bestimmt. Im Falle barotroper Ver-



hältnisse wird die Änderung des Drucks in einer konstanten Tiefe (z.B. bezogen auf NHN) ausschließlich durch das Wasserspiegelgefälle verursacht.

Druckgradient: Ist an zwei unterschiedlichen Orten der Druck im Wasser unterschiedlich groß, so stellt sich dazwischen ein Druckgradient ein, der u. U. eine Strömung verursachen kann. Je größer die Druckdifferenz und je kleiner der Abstand ist, desto stärker ist der Druckgradient.

Isobare: Linie oder Fläche gleichen Drucks.

Erläuterungen zu den Tidekennwerten (siehe auch DIN 4049-3)

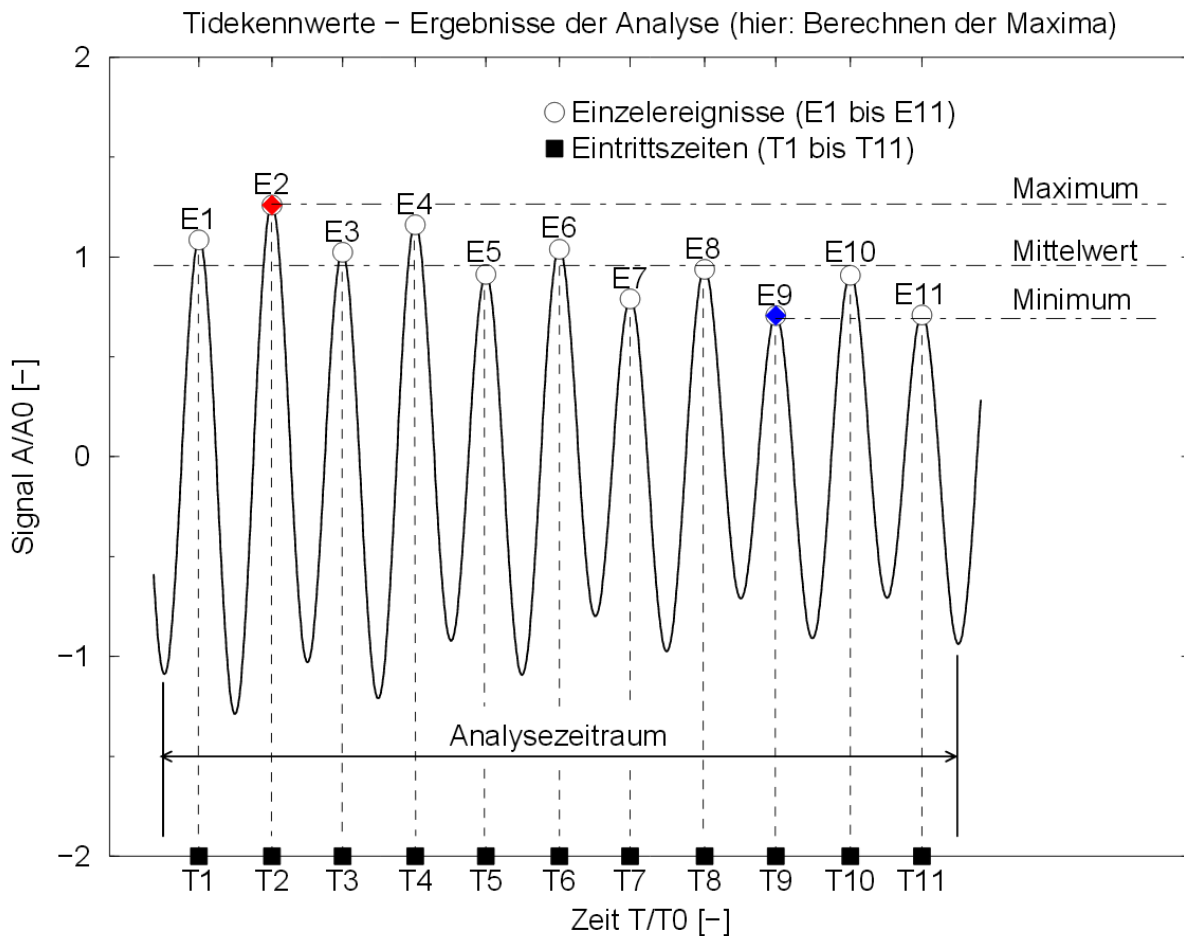


Bild 111: Maximum, Mittelwert u. Minimum des Analysezeitraums

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 Wasserstands

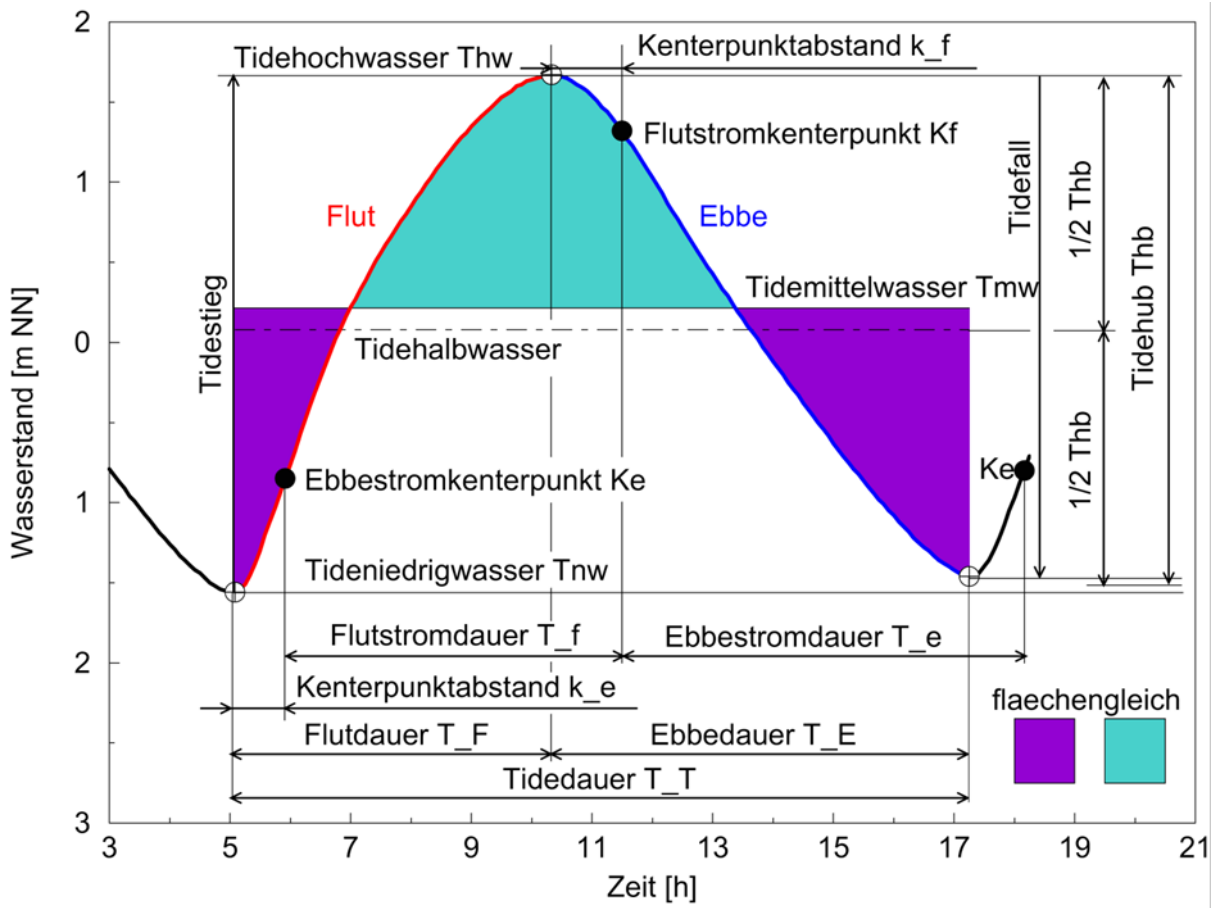


Bild 112: Tidekennwerte des Wasserstandes

Tidehochwasser (Thw): Höchster Wert der Tidekurve zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwassern

Tideniedrigwasser (Tnw): Niedrigster Wert der Tidekurve zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tidehochwassern

Tidehub (Thb): Mittlerer Höhenunterschied zwischen Tidehochwasser und den beiden benachbarten Tideniedrigwassern

Tidemittelwasser (Tmw): Wasserstand der waagerechten Schwerlinie einer Tidekurve

Erläuterungen zu Tidekennwerten der Strömung

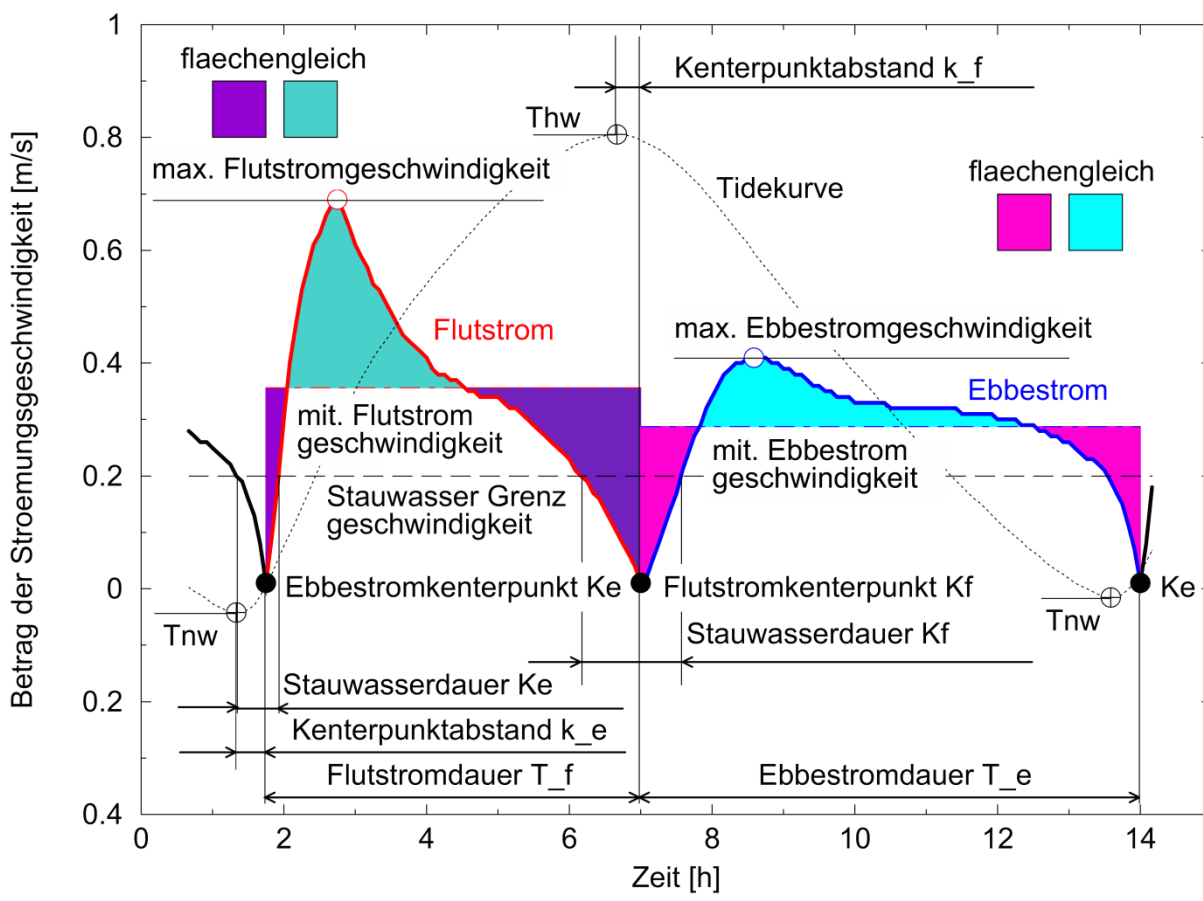


Bild 113: Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit

maximale Flutstromgeschwindigkeit: Maximalwert der Fließgeschwindigkeit während der Flutstromdauer

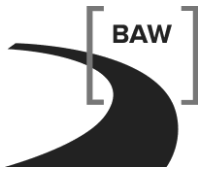
maximale Ebbestromgeschwindigkeit: Maximalwert der Fließgeschwindigkeit während der Ebbestromdauer

mittlere Flutstromgeschwindigkeit: Mittelwert der Fließgeschwindigkeit innerhalb der Flutstromdauer

mittlere Ebbestromgeschwindigkeit: Mittelwert der Fließgeschwindigkeit innerhalb der Ebbestromdauer

Flutstromvolumen: Wasservolumen, das einen Querschnitt während der Flutstromdauer durchfließt

Ebbestromvolumen: Wasservolumen, das einen Querschnitt während der Ebbestromdauer durchfließt



Tidestromvolumen: Summe der Beträge des Flutstromvolumens und des Ebbestromvolumens

Flutstromdauer: Zeitspanne zwischen dem Ebbestromkenterpunkt und dem folgenden Flutstromkenterpunkt

Ebbestromdauer: Zeitspanne zwischen dem Flutstromkenterpunkt und dem folgenden Ebbestromkenterpunkt

Eintrittszeit Flutstromkenterung: Offizielle Uhrzeit des Eintretens der Flutstromkenterung

Eintrittszeit Ebbestromkenterung: Offizielle Uhrzeit des Eintretens der Ebbestromkenterung

Erläuterungen zu Tidekennwerten des Salzgehalts

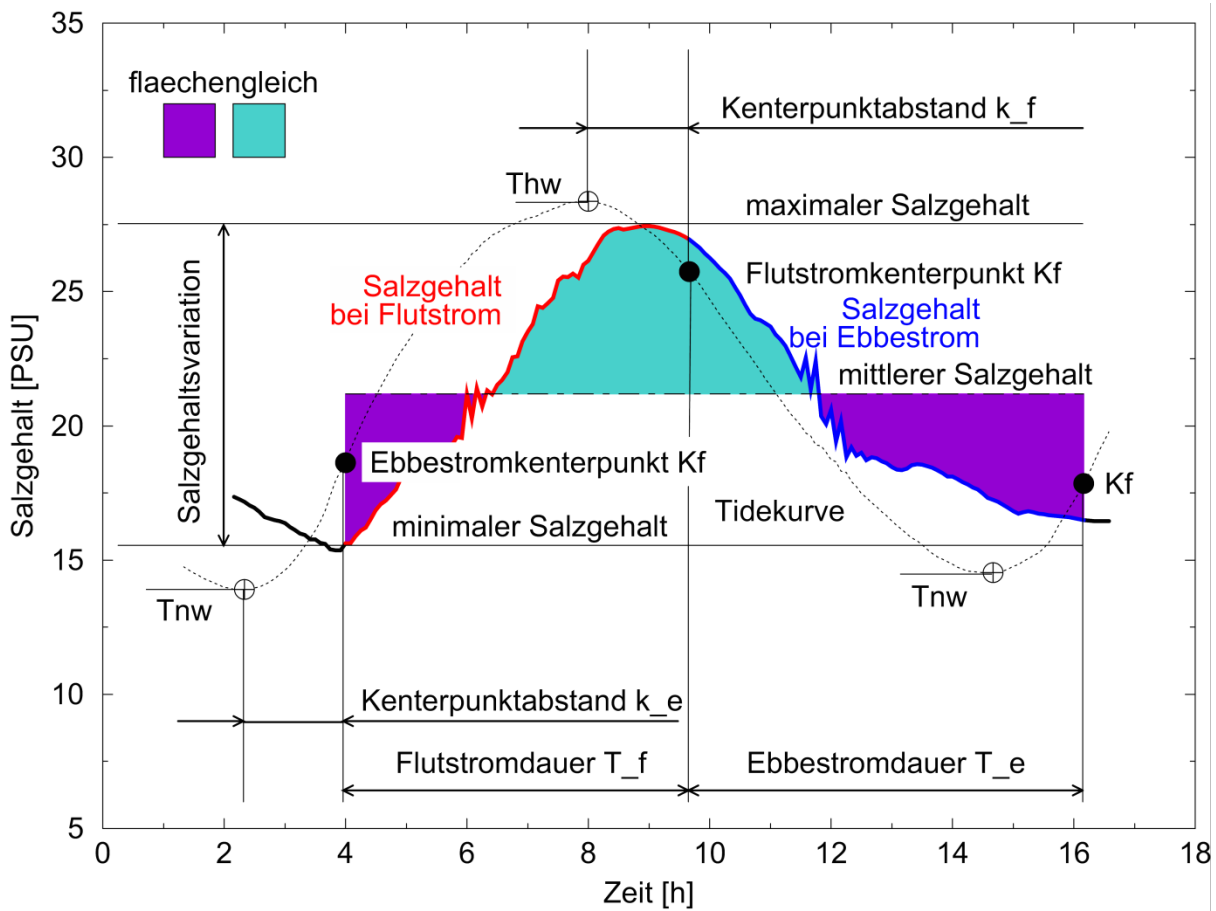


Bild 114: Tidekennwerte des Salzgehaltes

Minimaler Salzgehalt: Minimalwert des Salzgehalts während einer Tide (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebbestromkenterungen)

Mittlerer Salzgehalt: Mittelwert des Salzgehalts während einer Tide (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebbestromkenterungen)

Maximaler Salzgehalt: Maximalwert des Salzgehalts während einer Tide (zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ebbestromkenterungen)

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 diesem Ergebnisbericht dargestellten Ergebnisse sind in zwei Schritten weiter bearbeitet worden: Zuerst sind die Transporte über definierte Querprofile (Bild 115) 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.

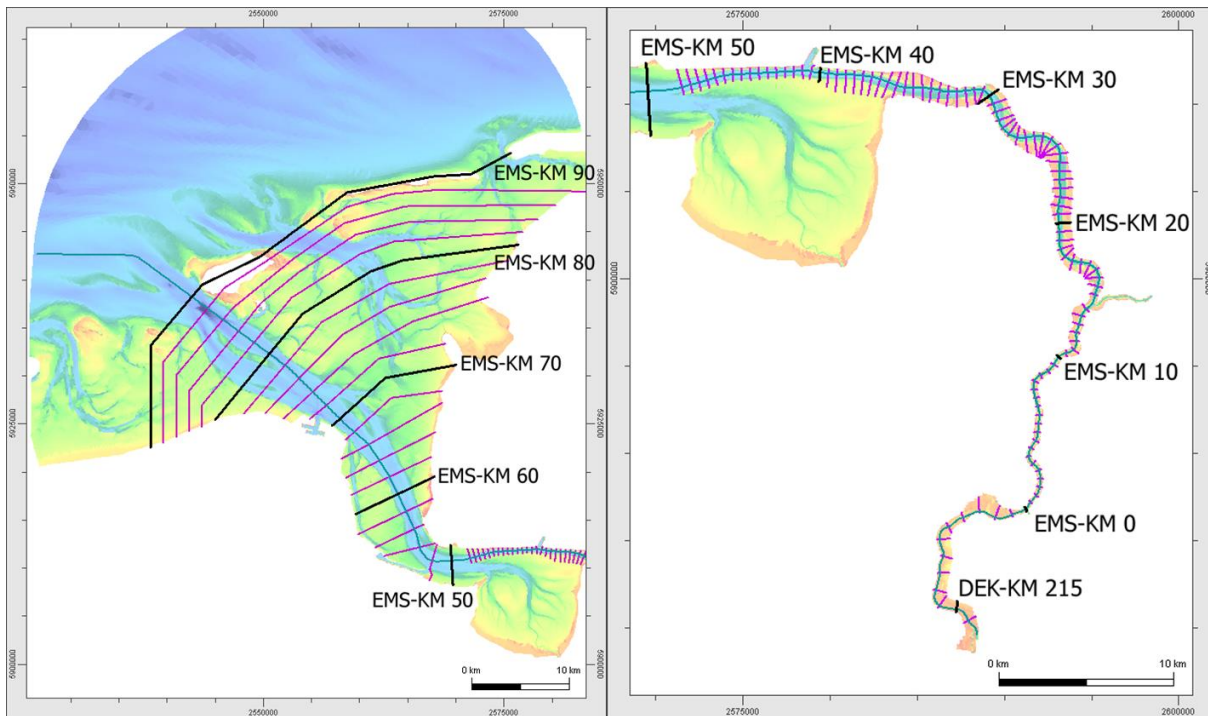


Bild 115: Lage der definierten Querprofile in der Außenems (links) und Unterems (rechts).

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

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

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

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 (-).

11 Übersicht verwendeter Modellläufe

Zustand	Modelllauf	Farbe
Ist-Zustand 2010 mit 44 m ³ /s Oberwasserzufluss	v260	Schwarz
Dauerhafte Sohlschwelle	v261	Rot

Tabelle 4: Verwendete Modellläufe zur Darstellung der Ergebnisse für die dauerhafte Sohlschwelle

Zustand	Modelllauf	Farbe
Ist-Zustand 2010 mit 44 m ³ /s Oberwasserzufluss	v260	Schwarz
Dauerhafte Sohlschwelle	v261	Rot
Flexible Sohlschwelle im Ebbestrom	v277	Grün
Flexible Sohlschwelle im Flutstrom	v285	Magenta

Tabelle 5: Verwendete Modellläufe zur Darstellung der Ergebnisse für die flexible Sohlschwelle nur Flutstrom oder nur im Ebbestrom

Zustand	Modelllauf	Farbe
Ist-Zustand 2010 mit 44 m ³ /s Oberwasserzufluss	v260	Schwarz
2h-Sohlschwelle im Flutstrom	v006	Rot
3h-Sohlschwelle im Flutstrom	v007	Grün
4h-Sohlschwelle im Flutstrom	v008	Blau
5h-Sohlschwelle im Flutstrom	v009	Hellblau
6h-Sohlschwelle im Flutstrom	v010	Magenta

Tabelle 6: Verwendete Modellläufe zur Darstellung der Ergebnisse für die Variation der Dauer einer flexiblen Sohlschwelle im Flutstrom

Zustand	Modelllauf	Farbe
Ist-Zustand 2010 mit 44 m ³ /s Oberwasserzufluss	v260	Schwarz
Dauerhafte Sohlschwelle	v261	Rot
4h-Sohlschwelle im Flutstrom	v008	Blau
Zeitweise komplette Schließung	v003b	Grün

Tabelle 7: Verwendete Modellläufe zur Darstellung der Ergebnisse für das zeitweise geschlossene Emssperrwerk um Tideniedrigwasser