

Dennis Oberrecht, Benjamin Franz & Andreas Wurpts

## Hydro- und morphodynamische Auswirkungen eines Tidesteuerungsbetriebes mit dem Emssperrwerk

- Analyse im Rahmen der Machbarkeitsstudie zum Masterplan Ems 2050 -



**Herausgeber:**

Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)  
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement  
-Forschungsstelle Küste-  
2016

**Titelblatt:** links: Impression Emssperrwerk (Foto: D. Oberrecht)  
rechts: Schematische Skizze der Ästuarzirkulation (A. Wurpts)

NLWKN - Forschungsstelle Küste  
An der Mühle 5, 26548 Norderney  
Tel.: 04932-916-0  
Fax: 04932-1394  
E-mail: [postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de](mailto:postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de)

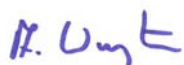
**NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR  
WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ  
Betriebsstelle Norden-Norderney  
-Forschungsstelle Küste-**

Dennis Oberrecht, Benjamin Franz & Andreas Wurpts

**Hydro- und morphodynamische Auswirkungen eines  
Tidesteuerungsbetriebes mit dem Emssperrwerk  
Analyse im Rahmen der Machbarkeitsstudie zum Masterplan Ems 2050**

Norderney, im Dezember 2016

Dezernent  
Forschungsstelle Küste



Dr.- Ing. Andreas Wurpts

Aufgabenbereichsleiterin  
Küsteningenieurwesen



Dipl.- Ing. Cordula Berkenbrink



# Hydro- und morphodynamische Auswirkungen eines Tidesteuerungsbetriebes mit dem Emssperrwerk

Dennis Oberrecht, Benjamin Franz & Andreas Wurpts

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Veranlassung</b>	<b>6</b>
<b>2. Untersuchungsgebiet</b>	<b>7</b>
2.1. Allgemein	7
2.2. Hydro- und Sedimentdynamik des Emsästuars	9
2.3. Sedimentverteilung und Schichtung des oberen Bodenkörpers	14
2.4. Tidesteuerung	15
<b>3. Untersuchungsansatz</b>	<b>18</b>
3.1. Datengrundlage	20
3.2. Hydrodynamischer Modellansatz	20
3.3. Tidesteuerungsansatz	22
3.4. Sedimenttransport- und morphodynamischer Ansatz	23
3.4.1. Fraktionierung, Sinkgeschwindigkeiten, Erosion und Deposition	23
3.4.2. Zusammensetzung des Bodenmodells	24
<b>4. Modellvalidierung</b>	<b>25</b>
4.1. Hydrodynamik	25
4.2. Tidesteuerung	26
4.3. Schwebstoffe und Morphodynamik	27
<b>5. Berechnungsergebnisse Hydrodynamik und Salzgehalte</b>	<b>30</b>
5.1. Beeinflussung der Gezeitendynamik	30
5.2. Beeinflussung der Tidevolumina	32
5.3. Beeinflussung der Salzgehalte	33
<b>6. Sedimenttransport und Morphodynamik</b>	<b>34</b>
<b>7. Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	<b>37</b>

<b>8. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>39</b>
<b>9. Abkürzungen und Symbole .....</b>	<b>41</b>
<b>10. Anlage .....</b>	<b>42</b>
<b>Anlage 01 – Beeinflussung der kurzfristigen residuellen Schwebstofftransporte..... durch variierende Oberwasserabflussmengen.....</b>	<b>42</b>
<b>Anlage 02 – Veränderung der Tideparameter durch die Ausbauten zwischen ..... 1937 und 2005 .....</b>	<b>45</b>
<b>Anlage 03 – Empirische Einschätzung der langfristigen morphologischen..... Entwicklung der Fließquerschnitte .....</b>	<b>49</b>
<b>Anlage 04 –Beschreibung des Modellansatzes zur Verbesserten Berücksichtigung..... der Flüssigschlickdynamik.....</b>	<b>53</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der niedersächsischen Küste mit dem Ems Ästuar. Die Farbschattierung zeigt die topografische Höhe im Gewässerbereich (ARGE Unter-/Außenems, 2012).....	8
Abbildung 2: Aktueller und vorangegangener Ausbauzustand der Ems zwischen Papenburg und Emden.....	9
Abbildung 3: Historische Entwicklung der Tidehoch- (durchgehende Linien) und Niedrigwasser (gepunktete Linien) .....	10
Abbildung 4: Darstellung der mittleren Gezeitenasymmetrie aus Pegelmesswerten des Jahres 2008.....	11
Abbildung 5: Mittlere Schwebstoffkonzentrationen und Standardabweichung des Jahres 2008.....	12
Abbildung 6: Jahresganglinien der Schwebstoffkonzentrationen des Jahres 2008.....	12
Abbildung 7: Unten: Großräumige Dynamik des Flüssigschlicks anhand der Mächtigkeit zwischen Lutokline und fester Sohle in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses in Herbrum.....	13
Abbildung 8: Beschaffenheit der Oberflächensedimente im Bereich der Außenems und des Dollart. ....	14
Abbildung 9: Darstellung des geschichteten Bodenaufbaus aus Sedimentecholotmessungen im Bereich der Unterems....	15
Abbildung 10: Querschnitt des Emssperrwerks mit Bezeichnung der Öffnungen. Linkes Ufer: Nordseite der Ems.....	15
Abbildung 11: Untersuchtes Tidesteuerungsszenario (Steuerungsmodus 4b entsprechend Gutachten Zanke 2016)..	17
Abbildung 12: Übersicht zur im Modellgebiet verwendeten Gitterauflösung.....	21
Abbildung 13: Eingerechnete Verteilung des Sohlsubstrats in der obersten Schicht des Bodenmodells.....	24
Abbildung 14: Vergleich gemessener und berechneter Salzgehaltsdifferenzen am Eingang in die Unterems im Emders Fahrwasser (Position bei Fahrwassertonne 61) über den Tidezyklus. ....	26
Abbildung 15: Das obere Diagramm zeigt den Vergleich zwischen den Zeitreihen gemessener und modellierter Wasserspiegelauslenkung während der Versuchsreihe 2012 in Gandersum. ....	27
Abbildung 16: Vergleichende Darstellung der morphologischen Entwicklung.....	28
Abbildung 17: Lage der in Abbildung 18 dargestellten Querschnitte. ....	29
Abbildung 18: Berechnete kurzfristige (48 Tage) morphologische Entwicklung der in Abbildung 17 dargestellten exemplarischen Querschnitte im Übergangsbereich in die Flüssigschlickzone. ....	29
Abbildung 19: Beeinflussung des Tidehochwassers (Thw) durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie). ....	30
Abbildung 20: Beeinflussung des Tideniedrigwassers (Tnw) durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).....	30
Abbildung 21: Beeinflussung des Tidehubs durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie). ....	31
Abbildung 22: Beeinflussung der Flutstromdauer durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).....	31
Abbildung 23: Beeinflussung der Ebbstromdauer durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).....	32
Abbildung 24: Auswertung der Gezeitenasymmetrie anhand des Verhältnisses von Flut – und Ebbstromdauer. ....	32
Abbildung 25: Vergleichende Darstellung der Tidevolumina für den Referenzzustand und den Tidesteuerungsfall. Oben: Flutstromvolumen, unten: Ebbstromvolumen. ....	33
Abbildung 26: Vergleichende Darstellung des Längsverlaufs der Salzgehaltsverteilung für Referenzfall und Tidesteuerungsbetrieb. Die gestrichelten Linien zeigen die minimalen Werte, die durchgehenden Linien die maximalen.....	34
Abbildung 27: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 50 m <sup>3</sup> /s Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	35
Abbildung 28: Darstellung der residuellen Schwebstofftransports (Referenzfall) nach 14 Tagen Analysezeitraum für verschiedene Oberwassermengen. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	35

Abbildung 29: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports bei einem konstanten Oberwasser von 25 m <sup>3</sup> /s. Die Berechnungen erfolgten mit einem Modellansatz, der die spezifischen Charakteristika des Flüssigschlicks berücksichtigt (s.a. Anlage 04). Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	36
Abbildung 30: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 25 m <sup>3</sup> /s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	42
Abbildung 31: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 50 m <sup>3</sup> /s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	43
Abbildung 32: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 75 m <sup>3</sup> /s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	43
Abbildung 33: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 100 m <sup>3</sup> /s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	44
Abbildung 34: Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 150 m <sup>3</sup> /s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an. ....	44
Abbildung 35: Historische Entwicklung der Tidehoch- (durchgehende Linien) und Niedrigwasser (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau). Die Kreuze zeigen die an den Pegelmessstellen erfassten Messwerte. ....	45
Abbildung 36: Unterems entsprechend historischer Rekonstruktion für den Zustand 1898 im Vergleich mit dem von 2005 .....	46
Abbildung 37: Exemplarische Darstellung zur Veränderungen der Tidekurve und der Strömungsgeschwindigkeiten für die Ems bei km 35 (Jemgum) zwischen 1937 und 2005 (Herrling & Niemyer 2008) .....	47
Abbildung 38: Historische Entwicklung der Flut- (durchgehende Linien) und Ebbdauern (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau). ....	47
Abbildung 39: Historische Entwicklung der Flut- (durchgehende Linien) und Ebbtidevolumina (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau). ....	48
Abbildung 40: Verhältnis von Abflussquerschnitten und angeschlossenen Tidevolumina für verschiedene Tidebecken an der Ostküste der Vereinigten Staaten von Amerika nach O'Brien (1939) .....	49
Abbildung 41: Verhältnis von Tidevolumina und Abflussquerschnitten des Kobadak-Flusses im Ganges, Brahmaputra und Meghna Mündungsdelta in Bangladesh nach Shampa & Pramanik (2012). ....	50
Abbildung 42: Empirische Zusammenstellung des Verhältnisses der Durchflussquerschnitte bei Tidemittelwasser und dem Ebbstromdurchfluss für verschiedene Ästuarie aus Han et al. (2003).	51
Abbildung 43: Darstellung der gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeit. Oben gemessen (Winter et al. 2016 & FSK), unten modelliert .....	53
Abbildung 44: Darstellung der gemessenen und modellierten Schwebstoffkonzentration. Oben gemessen (Winter et al. 2016 & FSK), unten modelliert .....	54
Abbildung 45: Darstellung der gemessenen und modellierten vertikalen Scherung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten. Oben: gemessen, unten: modelliert .....	55



## 1. Veranlassung

Im Rahmen der Umsetzung des Masterplan Ems (Vertrag „Masterplan Ems 2050“) untersucht die Forschungsstelle Küste im NLWKN die Auswirkungen des durch das Land Niedersachsen verfolgten Tidesteuerungsansatzes auf die Hydro- und Morphodynamik der Ems. Dieser hat zum Ziel, den Sedimenttransport flussaufwärts nachhaltig einzudämmen und damit in der Tideems einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Schlickproblems und zur Verbesserung des Gewässerzustands zu leisten.

Die Tidesteuerung am Emssperrwerk soll über die zeitweise Einschnürung des Querschnittes der Ems am Sperrwerk die Ausbreitung der Gezeitenwelle in die Unterems so beeinflussen, dass über die Reduzierung der Tideasymmetrie der resultierende Schwebstoffeintrag vermindert wird. Dabei soll das bisherige Tidevolumen soweit wie möglich erhalten bleiben, um im Sinne der übergreifenden Ziele des Masterplans die vorhandenen Querschnitte in der Unterems zu stützen.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind eine gutachterliche Grundlage für die Machbarkeitsstudie, die der Masterplan Ems für die Lösungen Tidesteuerung und Sohlschwelle (untersucht durch die WSV) für das Ende des Jahres 2016 fordert. Sie bilden gleichzeitig eine Grundlage für die weitergehenden vertieften Untersuchungen für einen möglichen Betriebsplan für das Sperrwerk unter Einschluss/Optimierung der als günstig identifizierten Lösungsvarianten.

Den Untersuchungen vorausgegangen ist eine Variantenuntersuchung zur Identifikation der geeigneten Tidesteuerungsvariante. Hierbei wurde einerseits über variierte Verbaugrade und Steuerungsdauern, andererseits –in Abstimmung mit Analysen zur Bauwerksstabilität infolge Kolkbildung- über Variation der für den Verbau heranzuziehenden Verschlüsse des Emssperrwerks die hier untersuchte Variante gefunden.

Das vorliegende Gutachten liefert eine Bewertungsgrundlage der Maßnahme Tidesteuerung in Hinblick auf Nutzeneffekte und die Abschätzung der Umweltauswirkungen, soweit diese im Rahmen der vertraglich für Ende 2016 veranschlagten Machbarkeitsuntersuchung mit abgedeckt werden.

Die dargestellten Ergebnisse stellen neben der gutachterlichen Grundlage für die Machbarkeitsstudie gleichzeitig auch einen hierzu abgeleiteten Zwischenstand der übergeordneten Arbeiten der Forschungsstelle Küste zur Ems dar. Diese zielen unter Verweis auf die im vergleichenden hydromorphologischen Gutachten (FTZ Westküste 2014a) dokumentierten Einschränkungen der verfügbaren Modelltechnik auf die Erstellung und Anwendung eines fortschrittlichen Modellwerkzeugs zur weiteren Optimierung des Tidesteuerungsbetriebs und weiterer Maßnahmen des Masterplan Ems2050 unter expliziter Einbindung wissenschaftlicher Forschung und Modellentwicklung.

## 2. Untersuchungsgebiet

### 2.1. Allgemein

Das Ems-Ästuar (Abbildung 1) bildet den aus Außen- und Unterems bestehenden Unterlauf der Ems. Dieser unterliegt dem Gezeiteneinfluss der Nordsee und dem Einfluss des am Wehr bei Herbrum einströmenden Oberwassers. Die Länge des Ästuars erstreckt sich von der Ostfriesischen Insel Borkum bis zum Tidewehr in Herbrum auf einer Länge von circa 110 Kilometern und ist in vier wesentliche Abschnitte unterteilt, beginnend mit der Außenems von Borkum bis zur Knock, dem Dollart, dem Emdener Fahrwasser von der Knock bis Pogum (bis Emden zur Außenems gehörig) und der Unterems von Pogum bis Herbrum (oberhalb Papenburg häufig als Dortmund-Ems-Kanal, DEK bezeichnet). Als wichtigste Wirtschaftsstandorte im Ems-Ästuar gelten der Tiefwasserhafen Eemshaven und die Häfen Emden, Leer und Papenburg, letzterer mit der Meyer-Werft.

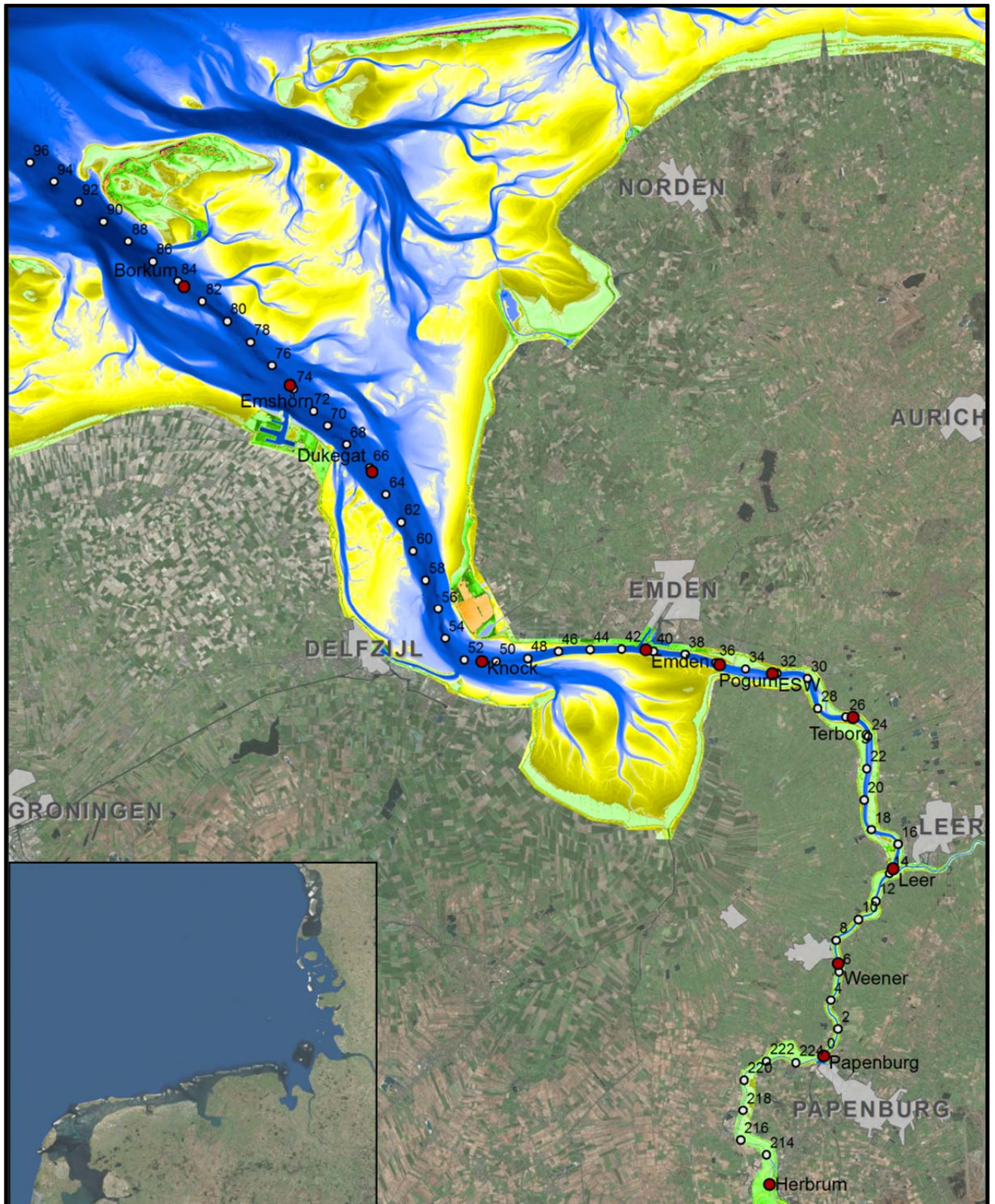
Seit dem 16. Jahrhundert wird die Ems durch menschliche Eingriffe im Flusslauf verändert. Bis Ende des 19. Jahrhunderts ging es hierbei vorrangig um Landgewinnung im Mündungsbereich, wo hingegen in den letzten etwa 100 Jahren verstärkt mittels verkehrswasserbaulicher Maßnahmen Anpassungen an die zunehmenden Anforderungen der Schifffahrt im Vordergrund der Aktivitäten standen. Seit 1950 wurde die Ems in diesem Zusammenhang mehrfach vertieft und die Unterems zwischen Terborg und Papenburg begradigt. Die Vertiefungen und übrigen Ausbauten sind ursächlich für die in den letzten Jahrzehnten beobachteten Veränderungen der Tidedynamik (Abbildung 3), welche die Anpassung an die Ausbauten in Form eines erheblich gesteigerten Tidevolumens beinhaltet.

Das Emssperrwerk bei Gandersum, fertiggestellt 2003, verbessert den Sturmflutschutz im Hinterland bis in die Stauhaltung oberhalb von Herbrum hinein. Im Falle einer Sturmflut mit einem Wasserstand höher als 3,70 m über Normal Null (NHN), werden die Sperrwerkstore geschlossen und somit ein Eindringen der Flutwelle flussaufwärts in die Unterems verhindert. Das Sperrwerk besteht aus sieben Toren, wovon fünf Hubtore und zwei Drehsegmenttore sind. Die Hubtore sind als Nebenöffnungen (NÖ) gekennzeichnet und die Drehsegmenttore werden für die Schifffahrt genutzt (Binnen- und Hauptschifffahrtsöffnung (BSÖ/HSÖ)).

Die gesamte Flussbreite beträgt am Emssperrwerk 476 Meter, wovon 13 Prozent durch Pfeiler verbaut sind, was eine effektive Querschnittsbreite von 414 Metern zur Folge hat. Die Öffnungsbreite der HSÖ beträgt 60 Meter und die der Binnenschifffahrtsöffnung 50 Meter.

Die Öffnungsbreite der nördlichen NÖ beträgt 50 Meter und die der vier Nebenöffnungen südlich der Binnenschifffahrtsöffnung 63,50 Meter. Das Emssperrwerk hat im geöffneten Zustand keine lokale Einschnürung des Fließquerschnitts der Ems zur Folge, um einen großräumigen morphologischen Nachlauf unmittelbar zu vermeiden.

Eine weitere Funktion hat das Emssperrwerk beim Überführen von Schiffen der Meyer-Werft in Papenburg. Zur Überführung von Neubauten mit einem Tiefgang von bis zu 8,50 m wird das Sperrwerk geschlossen und die Unterems so mit Hilfe des Oberwasserzuflusses bis zu einer maximalen Höhe von 2,70 m über NN aufgestaut. Für eine schnellere Auffüllung des Stauraumes sind zusätzlich im Sperrwerk sechs Pumpen mit einer Leistung von 100 m<sup>3</sup>/s installiert.

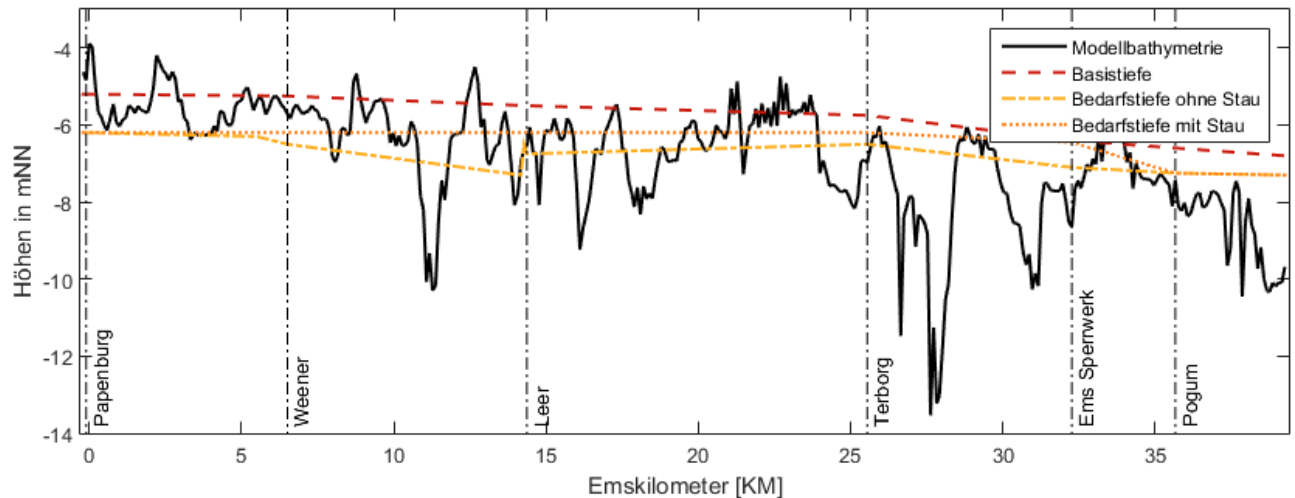


**Abbildung 1:** Darstellung der niedersächsischen Küste mit dem Ems Ästuar. Die Farbschattierung zeigt die topografische Höhe im Gewässerbereich (ARGE Unter-/Außenems, 2012).

Abbildung 2 verdeutlicht bezogen auf einen Längsschnitt entlang der unterhaltenen Fahrrinne der Unterems von etwa Emden bis Papenburg den derzeitigen und vorhergehenden Ausbauzustand der Unterems. Hierbei wird heute grundsätzlich der als Basistiefe bezeichnete Zustand unterhalten, der für die Überführung von Werftschiffen mittels Nassbaggerungen temporär auf die Bedarfstiefe vergrößert wird.



Vor Inbetriebnahme des Emssperrwerks im Jahr 2003 wurde hierzu die deutlich größere Bedarfstiefe ohne Stau für die Schiffüberführung innerhalb von zwei Tiden mit einer Liegewanne bei Leer hergestellt. Es existieren daher Abschnitte innerhalb der Unterems, in denen die Sohle bereits durch menschliche Eingriffe tiefer ausgebaggert war, als dies heute der Fall ist.



**Abbildung 2:** Aktueller und vorangegangener Ausbauzustand der Ems zwischen Papenburg und Emden

## 2.2. Hydro- und Sedimentdynamik des Emsästuars

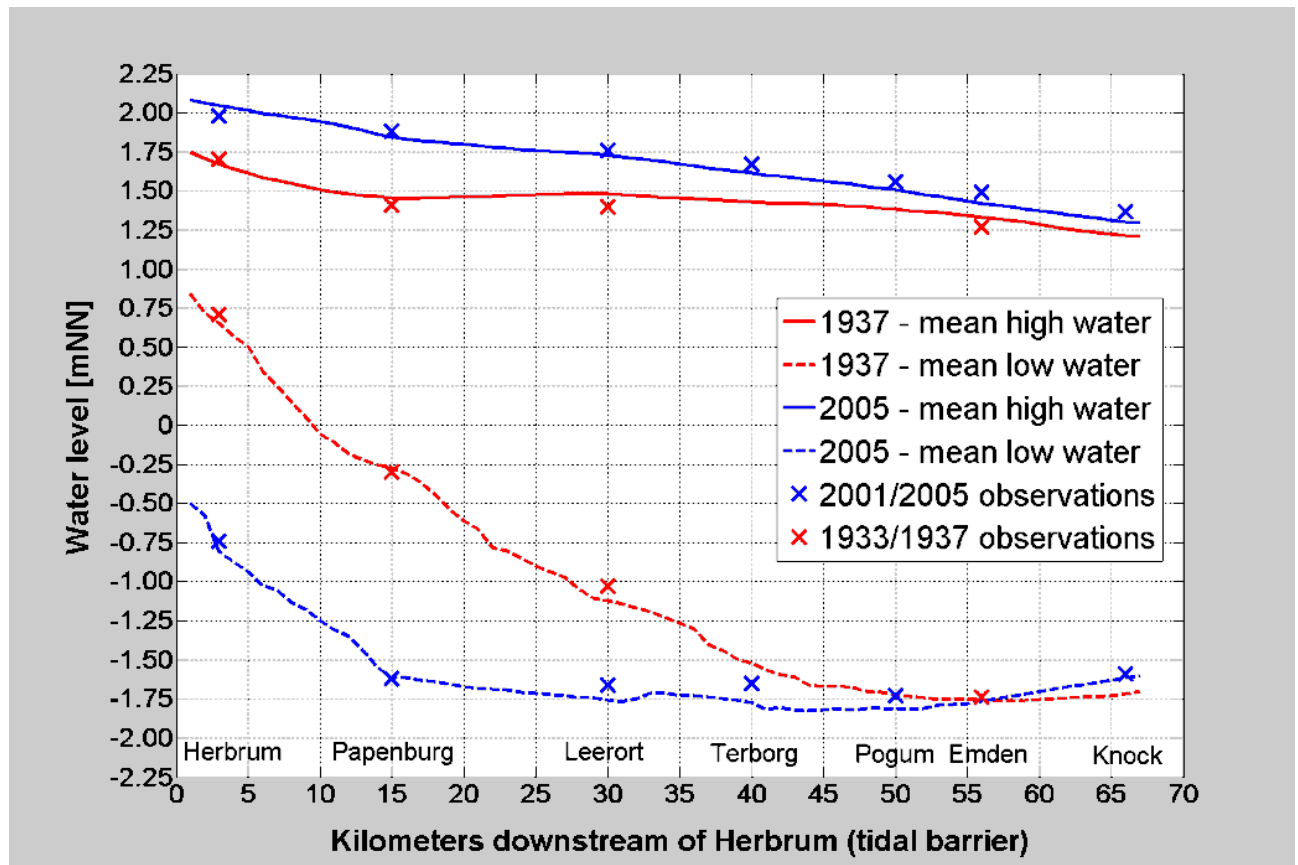
Die Wasserspiegelauslenkung im Emsästuar wird dominiert durch die Gezeitenbewegungen am seeseitigen Rand. Von hier aus breitet sich die Gezeitenwelle als Flachwasserwelle in das Ästuar aus und verändert dabei ihre Eigenschaften wie Tidehub und Fortschrittsgeschwindigkeit. Die Ausbreitung der Tidewelle im Flachwasser hängt hauptsächlich von der Wassertiefe und von der Sohlrauheit ab, wobei letztere eine dämpfende Wirkung auf die Ausbreitung der Tidewelle ausübt und in der Ems, u.a. bedingt durch die anthropogene Überprägung eine eher untergeordnete Rolle einnimmt.

In der Ems sind zwei grundsätzliche Transportzustände von Sediment zu unterscheiden, die unterschiedlich auf Veränderungen in der Gezeitendynamik reagieren. Im vorliegenden Fall sind zudem beide mit der komplexen Dynamik des Flüssigschlicks überlagert, was einerseits die modelltechnische Beschreibung, vor allem aber auch das grundsätzliche Verständnis der zugrundeliegenden Strömungs-Sediment-Zusammenhänge erschwert.

Als Geschiebetransport wird die Bewegung vorrangig sandiger Sedimente bezeichnet, die sich rollend und springend in unmittelbarer Sohlnähe bewegen. Als Suspensionstransport bezeichnet man eine Transportform, bei der die Turbulenz der Hauptströmung die –deutlich feineren– Sedimente aufwirbelt und über größere Bereiche der Wassersäule verteilt.

Flüssigschlick ist eine extreme Form besonders hoch konzentrierter Sedimentsuspension, deren physikalische Eigenschaften und daraus abgeleitet deren Verhalten sich deutlich von dem reinen Wassers oder weniger hoch konzentrierter Sedimentsuspensionen unterscheidet. Hierbei findet eine deutliche Zweiteilung der Wassersäule auf Höhe der sog. Lutokline statt, die sich durch eine „Entkopplung“ der oberen, frei strömenden und der unteren Flüssigschlickschicht zeigt. Das Vorhandensein von Flüssigschlick bewirkt hierdurch u.a. eine Abschirmung der festen Gewässer-

sohle gegenüber der Strömung und eine signifikante Reduzierung der effektiv auf die obere Schicht wirkenden Rauheit.



**Abbildung 3:** Historische Entwicklung der Tidehoch- (durchgehende Linien) und Niedrigwasser (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau). Die Kreuze zeigen die an den Pegelmessstellen erfassten Messwerte als fünfjährige Mittel. Aus Herrling & Niemeyer (2008)

### Gezeitenasymmetrie

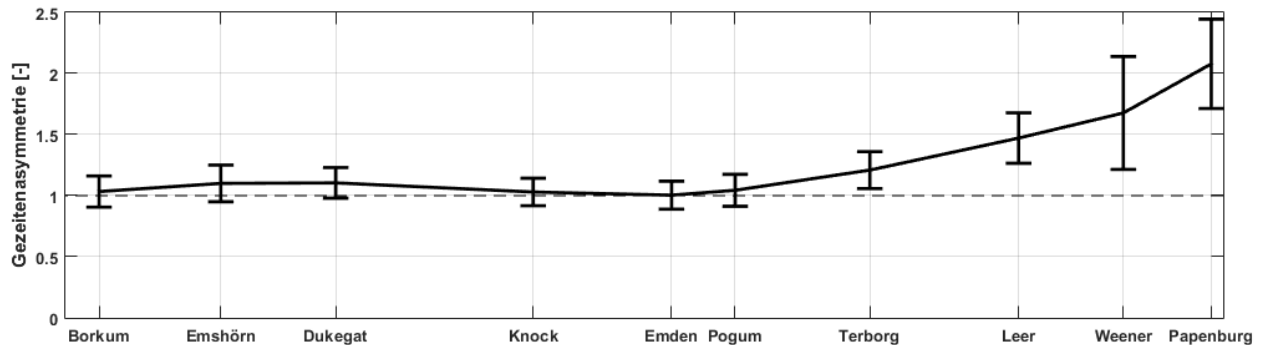
Durch die oben genannten Ausbauten und Vertiefungen hat sich die Ausbreitung der Gezeitenwelle durch das Emsästuar stark verändert. Der mittlere Tidehub am seeseitigen Rand beträgt im Mittel 2,20 m und steigt bis Papenburg auf eine Höhe von 3,50 m (1937 betrug er dort etwa 1,25 m). Bis zum Tidewehr in Herbrum klingt der Tidehub bis auf einen Wert von 2,70 (1937 etwa 1,0 m) wieder ab, s.a. Abbildung 3. Die Veränderung gegenüber den historischen Werten von 1937, d.h. vor den wesentlichen Ausbauten der Außen- und Unterems ist durch deren Angabe in Klammern dokumentiert. Weitere Details zur Veränderung der Tidedynamik infolge der Ausbauten der letzten Jahrzehnte zeigt Anlage 02.

Als Folge der Ausbaumaßnahmen hat sich die Tidekurve stark deformiert (Abbildung 38). Am Pegelstandort Papenburg wird heute nur noch eine Flutstromdauer von knapp 4,5 Stunden gemessen, wohingegen die Ebbstromdauer auf acht Stunden anstieg. Die beschriebene Entwicklung kann aus den in Anlage 1 dargestellten Ergebnissen detaillierter nachvollzogen werden.

Die Gezeitenasymmetrie (Abbildung 4) beeinflusst die Strömungsgeschwindigkeiten hin zu einem kurzen, aber intensiven Flutstrom gefolgt von einem verlängerten, jedoch schwachen Ebbstrom, je weiter man in Stromaufrichtung schreitet.

Durch die Vertiefungen und Begradigungen der Unterems verliert die Gezeitenwelle zudem weniger an Energie, was sich durch die stark ansteigende Gezeitenasymmetrie von Pogum bis stromaufwärts zum Tidewehr in Herbrum sowie den zugehörigen Tidehub (Abbildung 3) zeigt.

Der wesentliche Einfluss der Gezeitenasymmetrie auf den Sedimenttransport betrifft letztlich beide, den sohnahen, verstärkt bettbildenden und damit die langfristige morphologische Entwicklung steuernden Geschiebetransport sowie den Suspensionstransport und die Flüssig-schlickdynamik.



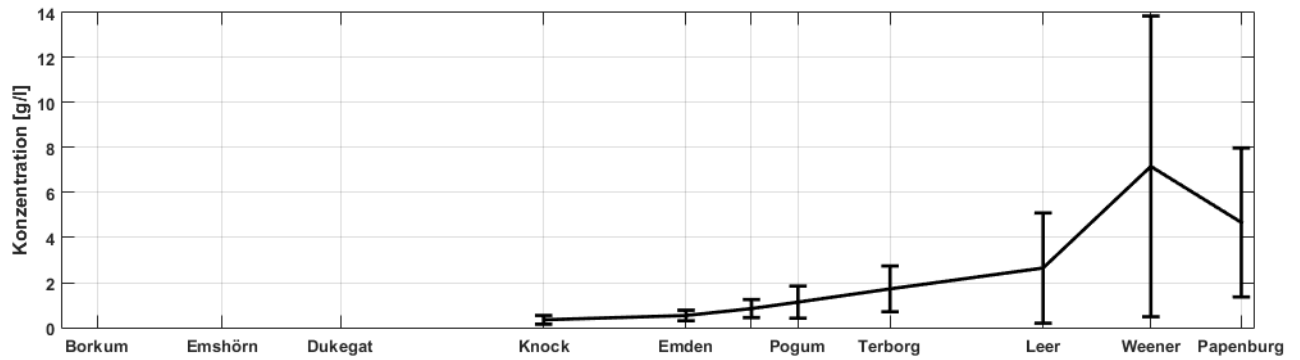
**Abbildung 4:** Darstellung der mittleren Gezeitenasymmetrie aus Pegelmesswerten des Jahres 2008 und deren Standardabweichung (Datengrundlage: NLWKN, WSA Emden).

### Barokline Ästuarzirkulation

Die barokline Ästuarzirkulation ist ein weiteres Phänomen mit Auswirkungen auf den Sedimenthaushalt. Da diese durch die Gewässerausbauten wie auch den Tidesteuerungsbetrieb beeinflusst wird, soll sie hier kurz beschrieben werden.

Der Antrieb der ästuarinen Zirkulation ist der Salzgehaltsunterschied entlang des Ästuars, welcher aus der Einmischung des Frischwassers aus dem Hinterland in das Salzwasser der offenen See resultiert. Unter den in der Ems gegebenen Umständen hat sie zur Folge, dass der Ebbstrom aufgrund des dichteren Wassers zuerst an der Sohle kentert und verzögert an der Oberfläche, während der Flutstrom zuerst an der Oberfläche kentert und verzögert an der Sohle. Die in dieser Form geschichtete Wassersäule kann in erster Näherung durch den Salzgehalts- oder auch Dichteunterschied zwischen Sohle und Oberfläche charakterisiert werden.

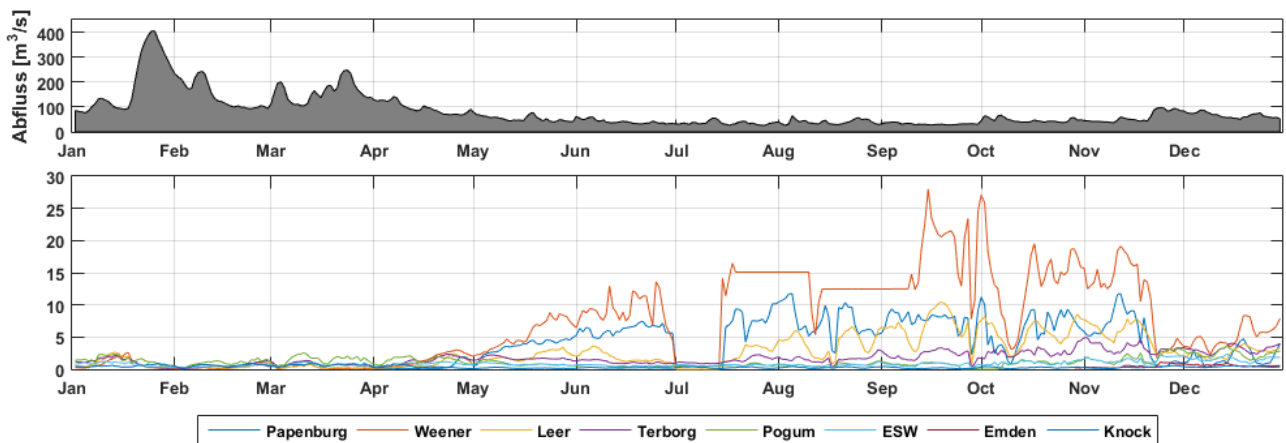
Dieses Phänomen wirkt auf die Sedimenttransporte, indem es im Bereich der Außenems den Stromauftransport suspendierter Feinsedimente begünstigt. Weiter landeinwärts, wo keine Salzgehaltsbedingten Dichteunterschiede mehr existieren, dominiert hingegen die Abflussrichtung der Oberwassermenge das Nettotransportgeschehen.



**Abbildung 5:** Mittlere Schwebstoffkonzentrationen und Standardabweichung des Jahres 2008 (Daten NLWKN Aurich/WSA Emden)

Auch findet eine Interaktion mit weiteren Prozessen statt, welche einen Dichteunterschied im Wasserkörper bewirken, wie beispielsweise dem weiträumig in der Unterems vorkommenden Flüssigschlick an der Gewässersohle.

Die barokline Ästuarzirkulation hat aufgrund der vorstehend umrissenen Charakteristik zwangsläufig die Existenz einer Trübungszone zur Folge, die allerdings aufgrund der Flüssigschlickproblematik nur noch marginal aus Schwebstoffmessungen abgeleitet werden kann (Abbildung 5 und Abbildung 6). Sie beeinflusst insbesondere die großräumigen Transportpfade suspendierter Feinstsedimente im Ästuar.



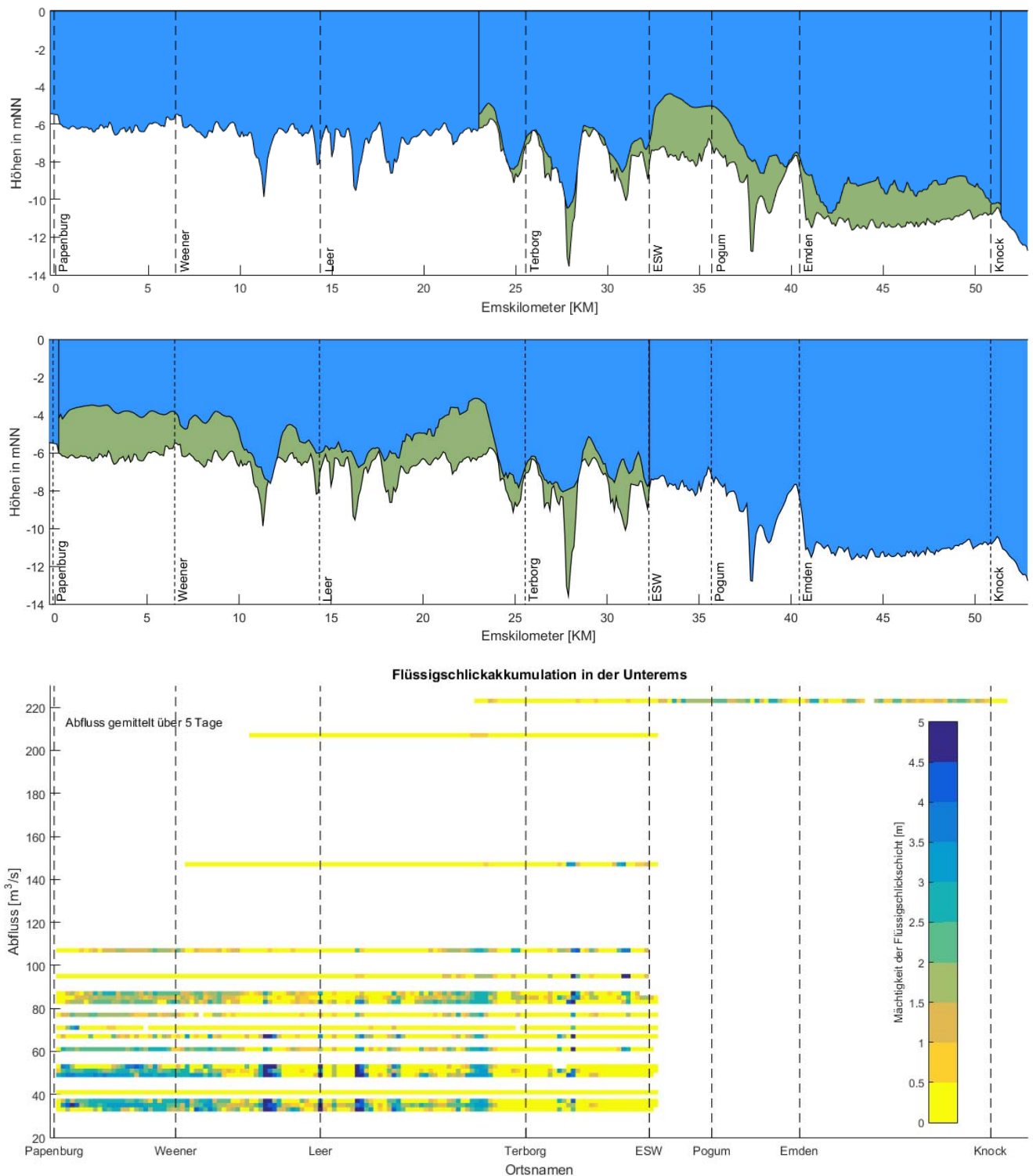
**Abbildung 6:** Jahressganglinien der Schwebstoffkonzentrationen des Jahres 2008 (Daten: NLWKN Aurich/WSA Emden)

Die Dynamik aus den beiden genannten Ästuar Phänomenen (Gezeitenasymmetrie und barokliner Zirkulation) führte in den letzten Jahren zur massiven Ansammlung von Feinsedimenten in der Trübungszone des Ems-Ästuars, die von Terborg stromaufwärts bis zum Tidewehr in Herbrum reicht, mit Suspensionskonzentrationen über 8 g/l am Pegelstandort Weener.

Die seeseitige Begrenzung der Trübungszone variiert abhängig vom horizontalen Dichtegradienten, momentanen Windeinfluss und der seeseitigen Wasserstandsauslenkung, dem Oberwasserzufluss und lokalen topografischen Einflüssen.

Gleiches gilt für die Ausdehnung der baroklinen Zirkulation, die sich im Emsästuar von Borkum bis circa Terborg erstreckt. Der Übergang von der baroklinen Ästuarzirkulation in die Trübungszone ist ebenfalls nicht klar abgegrenzt, sondern die beiden Bereiche gehen stetig ineinander über.

Abbildung 7 verdeutlicht die räumliche Variabilität des Flüssigschlicks basierend auf einem seit mehreren Jahren laufenden Monitoringprogramm. Anhand der im Längsschnitt zugeordneten Flüssigschlickschichtdicken wird abflussabhängig die räumliche Verteilung abgebildet.



**Abbildung 7:** Oben: Exemplarische Verteilung des Flüssigschlicks im Längsverlauf bei hohem Oberwasserabfluss ( $Q \sim 225 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Mitte: Exemplarische Verteilung des Flüssigschlicks im Längsverlauf bei mittlerem Oberwasserabfluss ( $Q \sim 65 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Unten: Großräumige Dynamik des Flüssigschlicks anhand der Mächtigkeit zwischen Lutokline und fester Sohle in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses in Herbrum. Oberhalb eines Schwellenwertbereiches von  $80 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$  wird der Flüssigschlick aus dem Abschnitt Herbrum bis Leer verstärkt nach seewärts verlagert und der Abschnitt von Papenburg bis Terborg weist wenig bis gar keinen Flüssigschlick auf.

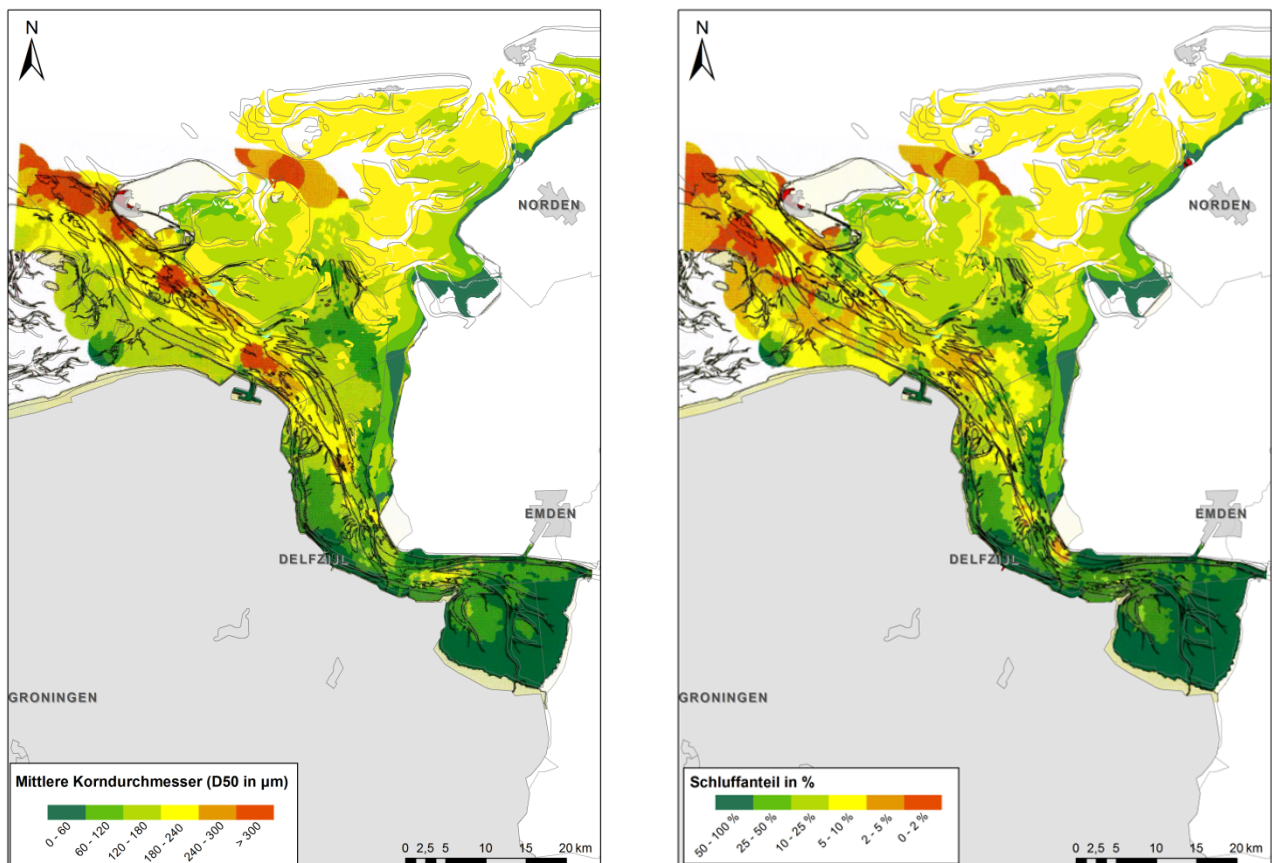


Oberhalb eines Schwellwertbereiches von 80 – 100 m<sup>3</sup>/s wird der Flüssigschlick aus dem Abschnitt Herbrum bis Leer verstärkt in seewärtige Bereiche verlagert. Bei hohen Oberwassermengen endet die Flüssigschlickschichtung am seeseitigen Ende des Emders Fahrwassers (kurz vor Position „Knock“).

### 2.3. Sedimentverteilung und Schichtung des oberen Bodenkörpers

Die Bodenbeschaffenheit in der Ems und der Unterems unterscheiden sich erheblich hinsichtlich des schluffigen Feinkornanteils, der in der Unterems deutlich höher ausfällt. Während die tieferen Bereiche der Außenems einen geringen bis moderaten Schluffanteil aufweisen, beträgt diese in der Unterems praktisch durchgehend mehr als 30%.

Zudem ist die Situation in der Unterems über weite Strecken durch die vor dem Bau des Emsperrwerks größeren Unterhaltungstiefen (s.a. Kapitel 2.1 und Abbildung 2) charakterisiert. In diesen Bereichen besteht das heutige Sohlssubstrat aus Material, welches nach Änderung der Bedarfstiefe auf das heutige Niveau sedimentiert und entsprechend homogen ist.



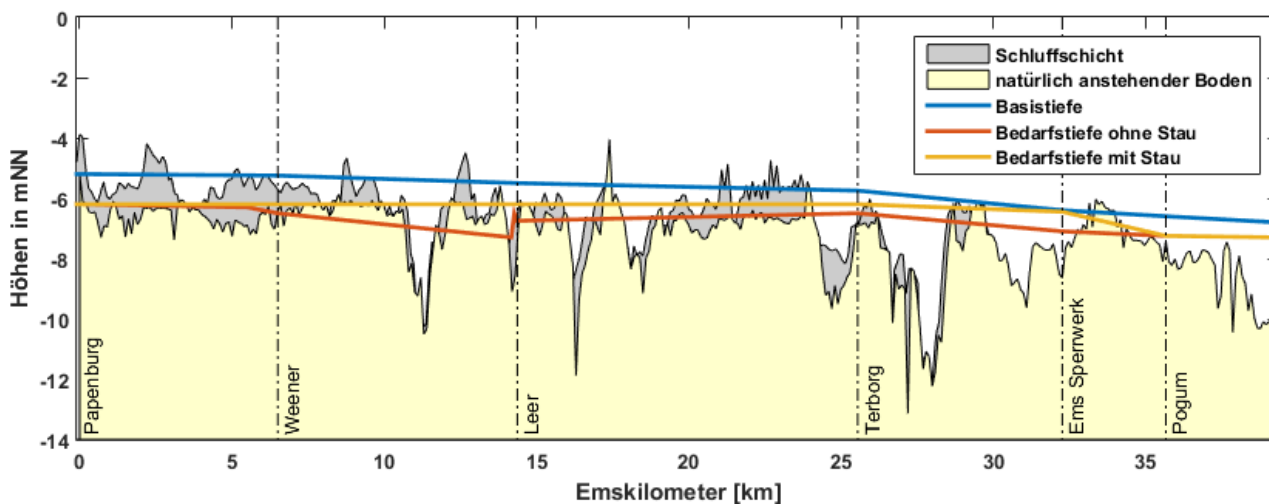
**Abbildung 8:** Beschaffenheit der Oberflächensedimente im Bereich der Außenems und des Dollart. Links: Mittlerer Korndurchmesser, rechts: Schluffanteil. Die in den Karten verschnittenen Datensätze stammen aus MCLA-REN, P. et al. (1998), Meyer & Ragutzki (1999) und der niedersächsischen Sublitoralkartierung.

Durch die hohen Feinkornanteile weist das Material erhebliche Kohäsion auf, die den Bewegungsbeginn gegenüber dem reinen Sandes erhöht und das Bodensubstrat entsprechend wenig mobil macht.

Langfristige morphologische Reaktionen laufen unter diesen Umständen langsam ab, wohingegen die Flüssigschlicksuspension sehr beweglich ist und bereits auf Änderungen der Oberwasser- oder auch des Tidehubes infolge Extremereignissen oder Stauentlastungen nach Schiffsüberführungen reagiert.

Zur Berücksichtigung der Sedimentzusammensetzung des Bodenmodells im Bereich der Unterems wurden Messdaten von einem Mehrfrequenzecho- und Sedimentecholot, sowie Sedimentproben mit einem Frahmloch ausgewertet. Die Auswertung der Messdaten des Sedimentecholotes zeigt eine bis zu zwei Meter mächtige und stabile Schicht direkt unterhalb der Gewässersohle, die ortsvariabel einen Schluff-/Tonanteil in der Größenordnung von 70 % aufweist.

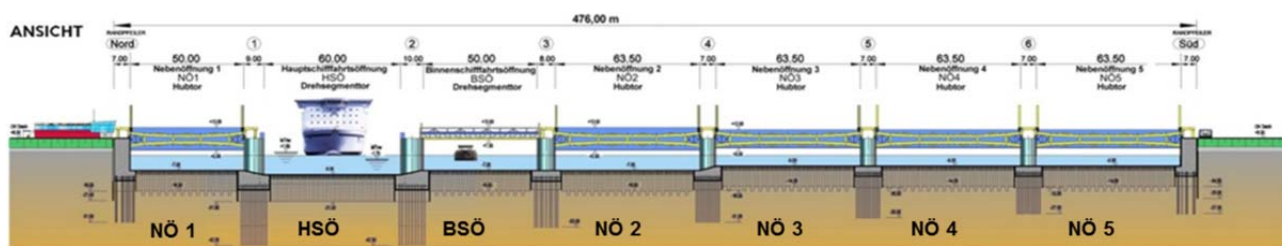
Unterhalb der in Abbildung 9 dargestellten schluffhaltigen Schicht befindet sich der natürlich anstehende Bodenkörper, der im morphodynamischen Modell aus bestehenden Kernbohrungen der WSV Emden sowie unter Hinzunahme von Informationen aus der geologischen Grundkarte Niedersachsen (LBEG) hinsichtlich der Lage der Holozänbasis aufgebaut ist.



**Abbildung 9:** Darstellung des geschichteten Bodenaufbaus aus Sedimentecholotmessungen im Bereich der Unterems. Die Flüssigschlickschicht ist nicht dargestellt.

## 2.4. Tidesteuerung

Der Tidesteuerungsansatz basiert auf der Beeinflussung der großräumigen Tidedynamik im Emsästuar durch gezielte Beeinflussung des Durchflussquerschnitts im Emssperrwerk. Hierzu werden für einen Teil des Gezeitenzyklus einzelne Sperrwerksöffnungen durch Absenken der Hubtore (Binnenschiffahrtsöffnung und Nebenöffnungen) oder Anheben des Drehsegment-schützes der Hauptschiffahrtsöffnung verkleinert oder ganz verschlossen.



**Abbildung 10:** Querschnitt des Emssperrwerks mit Bezeichnung der Öffnungen. Linkes Ufer: Nordseite der Ems

Die zusätzliche Einschnürung des Fließquerschnitts hat am Bauwerk lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und Aufstau zur Folge, großräumig reduziert sie jedoch die Gezeitendynamik.

Der Tidesteuerungsansatz hat hierbei zwei entgegengesetzt wirkenden Mechanismen zu genügen:

- Eine längere Steuerungsdauer sowie auch stärkerer Querschnittsverbau während der Tidesteuerung haben eine positivere Wirkung hinsichtlich der Reduzierung der Tideasymmetrie.
- Gleichzeitig verursachen diese aber eine zunehmend stärkere Reduzierung des Tidevolumens, die zunehmend das Räumvermögen der Ebbströmung schwächt. Hierzu sei auf die empirischen morphologischen Gleichgewichtsbetrachtungen nach O'Brien (1939), Han et al. (2003), Shampa & Pramanik (2012) und anderen verwiesen, die entsprechende Anpassungsvorgänge auch bei Ästuarbauten belegen (s.a. Anlage 03).

Hinsichtlich der maximalen Wirkung zur gewünschten Beeinflussung des Transportregimes ist eine Steuerungsdauer von 4h in Vorstudien abgeleitet worden.

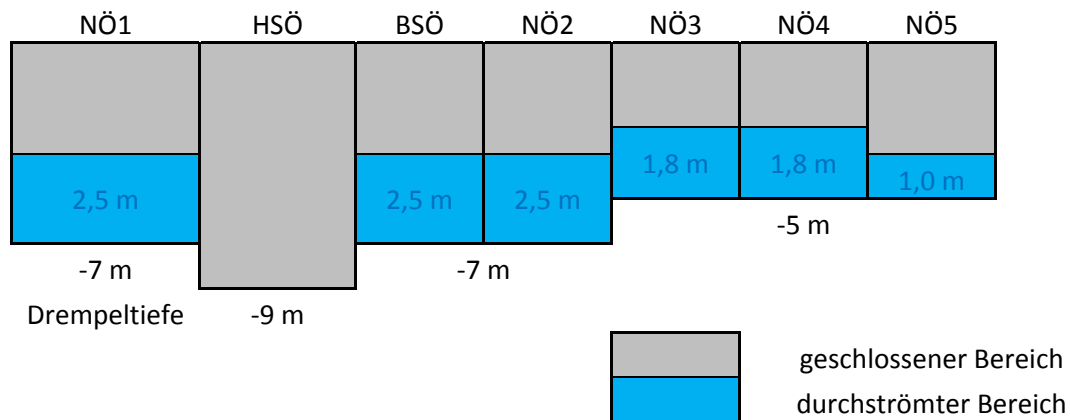
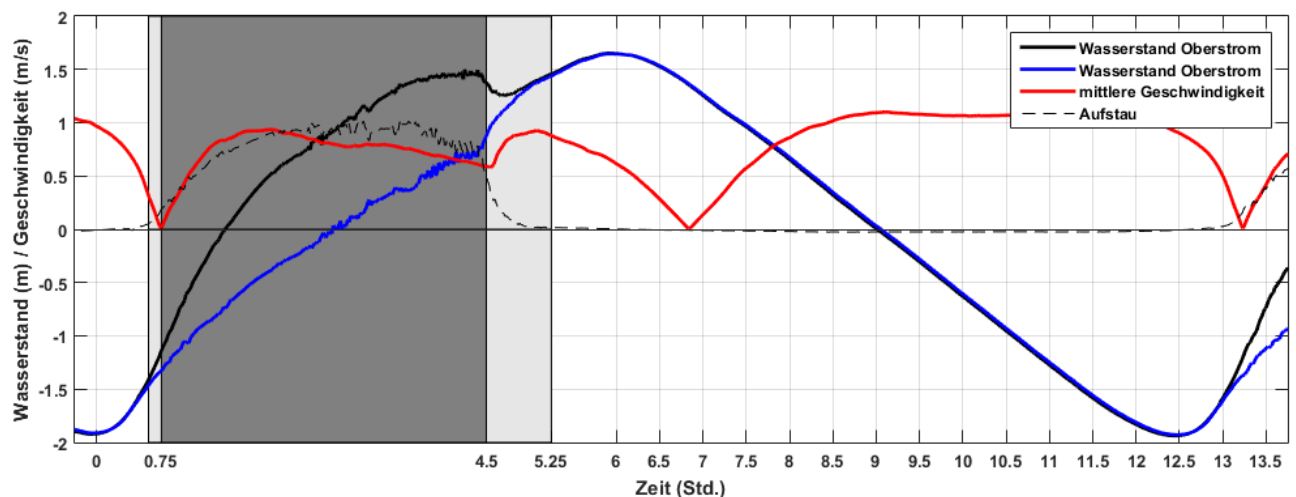
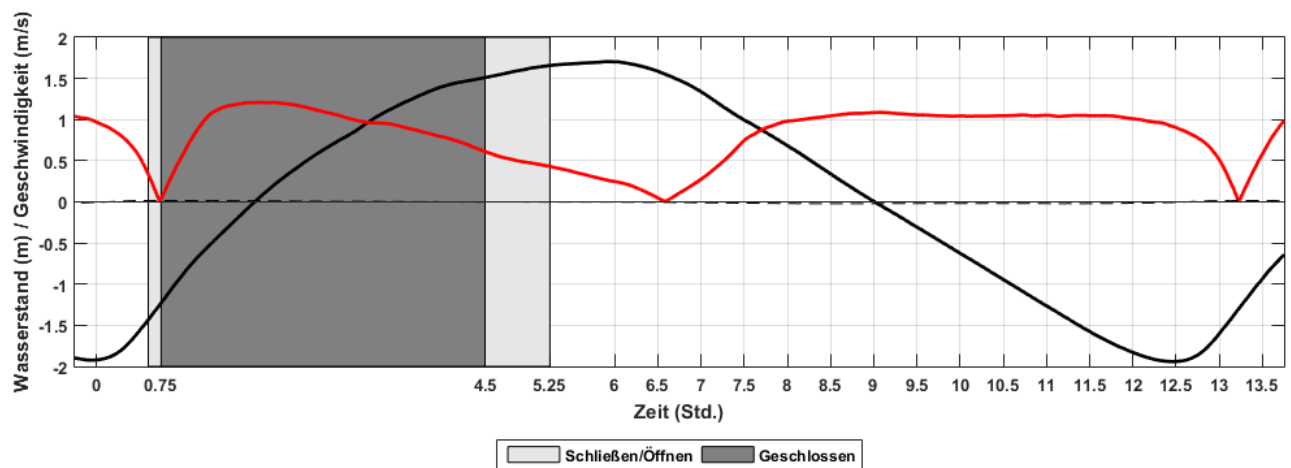
Der hier untersuchte Tidesteuerungsansatz ist das vorläufige Ergebnis einer Optimierung hinsichtlich der Maximierung der Wirksamkeit des Tidesteuerungsbetriebes auf die angestrebte Verbesserung des Transportverhaltens und gleichzeitig einer hinsichtlich des Kolksschutzes (Zanke 2016) dauerhaft umsetzbaren Tidesteuerung.

Im Ergebnis reduziert der Tidesteuerungsbetrieb die Gezeitenasymmetrie unter weitgehender Beibehaltung des Tidevolumens. Für die Abschätzung der Auswirkungen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport sei auf die Kapitel 5 und 6 verwiesen.

Im vorliegenden Fall wird mit der Stromkenterung zur Flut hin (gemessen am Emssperrwerk) der Querschnitt entsprechend Abbildung 11, unten reduziert. Der zeitliche Verlauf ist in Abbildung 11, Mitte dargestellt. Die untersuchte Tidesteuerung (Variante 4b entsprechend Zanke 2016) beginnt mit der Stromkenterung 0,75h nach T<sub>nw</sub> und endet bei 5,25h nach T<sub>nw</sub>. Die gesamte Sperrung einschließlich Heben und Senken der Hubtore dauert mithin 4,5h.

Dieser Steuerungsmodus kann, beispielsweise in Abwägung der Ansprüche in Hinblick auf Schiffbarkeit, verkürzt werden, wodurch sich jedoch die großräumige Wirksamkeit der Tidesteuerung reduziert.

Im Rahmen der konkreten Betriebsplanung und Optimierung eines späteren operationellen Tidesteuerungsbetriebes ist dessen weitergehende Anpassung unter Einbeziehung weiterer Randbedingungen (Oberwasserabflussmengen, Windstaueffekte) und möglicher Nutzungskonkurrenzen (z.B. Schifffahrt, Wasserwirtschaft) vorgesehen. Auch ist der Tidesteuerungsansatz kurzfristig flexibel an geänderte Randbedingungen anpassbar.



**Abbildung 11:** Untersuchtes Tidesteuerungsszenario (Steuerungsmodus 4b entsprechend Gutachten Zanke 2016). Darstellung im Querschnitt (unterste Abbildung) und im zeitlichen Verlauf (mittlere Abbildung) mit Tidekurve und Hervorhebung gesperrter (grau hinterlegt) und geöffneter/schiffbarer Zeiträume. Oberste Abbildung: unbeeinflusste Tidekurve ohne Tidesteuerungsbetrieb. Man beachte, die dargestellte Tidesteuerung beginnt mit der Stromkenterung 0,75h nach Tnw und endet bei 5,25h nach Tnw. Die gesamte Sperrung einschließlich Heben und Senken der Hubtore dauert 4,5h.

### 3. Untersuchungsansatz

In der vorliegenden Studie werden die Auswirkungen des untersuchten Tidesteuerungsbetriebes auf die Hydrodynamik sowie die Sedimenttransporte und Morphologie mit Hilfe vollständig gekoppelter hydro-morphodynamischer Modellrechnungen abgeschätzt.

Zur Modellierung des Tidesteuerungsfalles wurde eine Erweiterung des Modells vorgenommen, die eine Berücksichtigung des Energieverlustes beim Unterströmen der teilgeöffneten Sperrwerkstore ermöglicht. Hierdurch wird es möglich, die Beeinflussung der Hydrodynamik des Gesamtsystems anhand der temporären Einschnürung am Emssperrwerk zu berücksichtigen.

Die Reduzierung der Gezeitenasymmetrie kann unmittelbar bereits mit hydrodynamischen Modellrechnungen anhand von Tidekennwerten identifiziert werden, jedoch sind diese in zweierlei Hinsicht für die dauerhafte Wirkung auf die Sedimenttransporte nicht aussagekräftig.

Einerseits vernachlässigt diese Betrachtung die Wirkung der mittel- bis langfristig als Folge des Tidesteuerungsbetriebes veränderten Topographie des Systems. Andererseits sind Tidekennwerte grundsätzlich nur Indikatoren, die hinsichtlich einer erwarteten Wirkung auf die Sedimenttransporte interpretiert werden müssen, da eine eindeutige Zuordnung aus lokal berechnetem Tidekennwert und morphologischer Reaktion des System physikalisch nicht möglich ist.

Eine hinreichende Quantifizierung der langfristigen Wirkung auf die Sedimenttransporte kann nur mit Hilfe mittel- bis langfristiger vollständig morphodynamischer Modellrechnungen mit frei beweglicher Sohle erfolgen. Solche Modellrechnungen sind ebenso für die dauerhafte Wirkung des reduzierten Tidevolumens (Anhang 03) erforderlich.

Das Modellsystem ist anhand hydrodynamischer Messgrößen kalibriert. Zur Beurteilung der Modellqualität werden im nachfolgenden Kapitel 4 die wesentlichen Ergebnisse der Kalibrierung und eine qualitative Validierung der Morphodynamik anhand gemessener Daten gezeigt.

Die Modellrechnungen umfassen einen vierwöchigen Berechnungszeitraum (siehe Kapitel 0), was dem vorgenannten Erfordernis mittel- bis langfristiger morphodynamischer Rechenläufe nicht genügt. Dies geschieht aus zwei Gründen: Einerseits ist der hohe hiermit verbundene Arbeits- und Berechnungsaufwand im Rahmen einer Machbarkeitsstudie nicht darstellbar. Andererseits wird die Modelltechnik vorab der Verfügbarkeit der weiter unten in diesem Abschnitt beschriebenen Modellerweiterung den an eine solche Rechnung zu stellenden Anforderungen hinsichtlich der die Unterems dominierenden Flüssigschlickdynamik nicht gerecht.

Die hier vorgenommene Verwendung vollständig gekoppelter hydro-morphodynamischer Modellrechnungen (Details s. Kapitel 3.4) für einmonatige Rechenläufe stellt in diesem Zusammenhang also einen Kompromiss dar, der einerseits belastbare Aussagen zur grundsätzlichen Beeinflussung der Schwebstoffdynamik liefert und andererseits den Berechnungsaufwand auf das im Rahmen des für die Machbarkeitsstudie Darstellbaren begrenzt.

Die Auswirkungen der Tidesteuerung werden im Vergleich zum Referenzzustand dargestellt. Der Tidesteuerungsfall wie auch der Referenzzustand werden hierbei mit dem Modellsystem nach dem Stand der Technik (3.4) berechnet.

Aufgrund der hydro- und morphodynamischen Implikationen der Flüssigschlickschicht, die in der bisherigen Modelltechnik nicht hinreichend berücksichtigt werden können, wird zur Berechnung der Schwebstofftransporte ein ergänzender Ansatz verfolgt.

Die in den Kapiteln 5 und 6 dargestellten Ergebnisse wurden mit einem aufwändig an die lokalen Verhältnisse der Unterems angepassten Modellsystem entsprechend des derzeitigen Standes der Technik berechnet. Hierbei wurde ein deutlich höherer Aufwand getrieben, als er derzeit im Rahmen des Vergleichenden hydromorphologischen Gutachtens (FTZ Westküste 2014a) realisiert werden konnte, insbesondere wurden im Rahmen aufwändigen Monitorings und weiterer Einzeluntersuchungen Unsicherheiten relevanter Modellparameter erheblich eingegrenzt.

Die resultierenden Berechnungsergebnisse weisen daher eine hohe Qualität auf und beheben verschiedene im FTZ-Gutachten benannte Schwachstellen, bleiben aber zwangsläufig begrenzt auf die ebenfalls bereits dort benannte Unsicherheit dieser Modelltechnik im Umgang mit Flüssigschlick. Dieser kann hinsichtlich wesentlicher Eigenschaften (u.a. Schwebstofftransport und resultierende Morphodynamik) mit dem Modellansatz nicht hinreichend berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund entwickelt der NLWKN im Rahmen seiner Arbeiten für den Masterplan Ems eine Erweiterung des hydro-morphodynamisch-numerischen Modellansatzes zur verbesserten Berücksichtigung des Flüssigschlicks, um ein Werkzeug zur Betriebsplanung und für das langfristige Management der Tidesteuerung und für weitere wasserwirtschaftliche Fragestellungen des Ästuars verfügbar zu haben.

Im Rahmen dieses Gutachtens wird diese neuartige Modelltechnik für qualitative Aussagen zur Beeinflussung der Schwebstoffdynamik (s.a. Kapitel 6, Abbildung 34) ergänzend zum Ansatz des Modells entsprechend dem Stand der Technik (Kapitel 3.2 bis 3.4) verwendet.

Zur Erläuterung des neuen Ansatzes wird auf die in Anlage 04 zu diesem Zweck zusammengestellten Informationen verwiesen.

### 3.1. Datengrundlage

Die verwendete Modelltopographie beruht auf kombinierten Laserscan- und Peildatensätzen der Ems aus dem Jahr 2010 (ARGE Unter-/Außenems, 2012).

Zur hydrodynamischen Modellkalibrierung und -validierung sind Pegelzeitreihen für Wasserstand, Geschwindigkeit und Salzgehalt des WSA Emden und des NLWKN Aurichs verwendet worden.

Zudem wurden Wasserstands- Strömungs- und Sedimentmessdaten aus zwei Tidesteuerungs-Naturversuchen 2009 und 2012 verwendet.

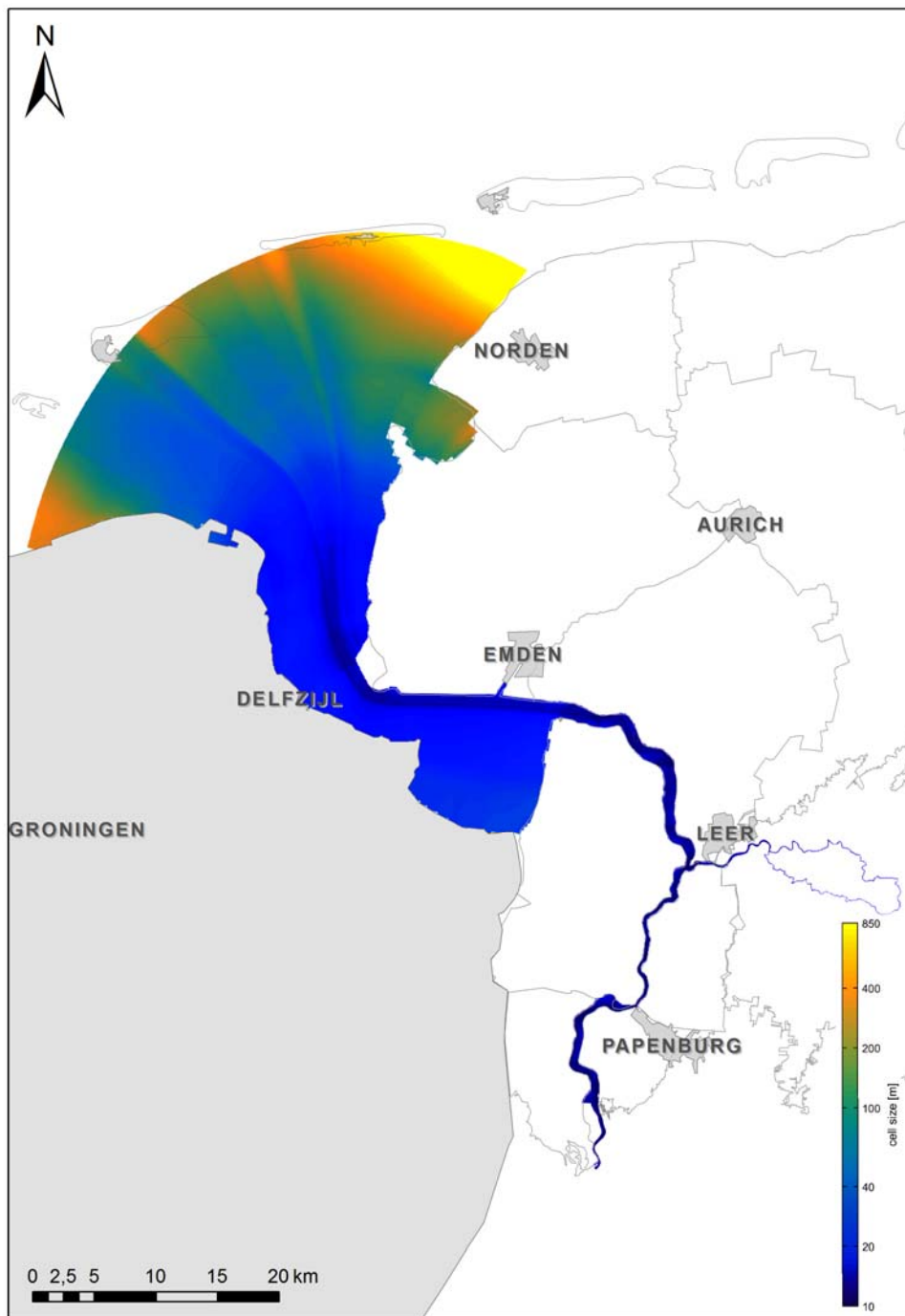
Für die morphodynamische Validierung des Erosions- und Suspensionsverhaltens sind die Verkehrssicherungspeilungen des WSA Emden aus dem Jahr 2010 verwendet worden. Der Zeitraum 26.03.2010 – 25.05.2010 weist hierbei keinerlei Eingriffe durch Unterhaltungsbaggerungen oder Schiffsüberführungen auf.

Des Weiteren wurden monatliche Echolot-Längsprofilpeilungen der Unterems, sowie Vertikalprofile der Dichte aus den Jahren 2013 bis 2016 des NLWKN zur Validierung des Modells verwendet.

### 3.2. Hydrodynamischer Modellansatz

Zur Modellierung der hydro- und morphodynamischen Prozesse des Emsästuars wird das mit einem strukturierten, kurvenlinearen Berechnungsgitter (ca. 50.000 Zellen in der Horizontalen) diskretisierte dreidimensionale Modellwerkzeug Delft3D (Deltares, 2014) verwendet. Dieses auf der Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichung aufsetzende Programm ist entsprechend der hydrodynamischen und morphodynamischen Anforderungen der zu untersuchenden Fragestellung wie in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben konfiguriert und erweitert worden.

Die Auflösung des Rechengitters variiert zwischen einigen hundert Metern in den Randbereichen der Außenems und Osterems, in der Tiefen Rinne der Unterems sowie den Seitenbereichen Leda und Jümme geht die Auflösung bis auf 10-15 Meter herauf (Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Übersicht zur im Modellgebiet verwendeten Gitterauflösung

Das Modellgitter erstreckt sich auf einer Länge von ca. 120 km, im Norden beginnend an den Inseln Rottumerplaat, Borkum und Norderney bis über das Tidewehr in Herbrum hinaus nach Bollingerfähr. Die Erweiterung über Herbrum hinaus stellt sicher, dass die bei hohen Thw erfolgende Ausbreitung der Tidewelle über das Wehr Herbrum hinaus abgebildet werden kann. Das Modellgitter bildet auch das Leda-Jümme Gebiet ab, das bei Leerort mit der Leda in die Ems mündet. Dies ist erforderlich, um im Bereich der Ledamündung eine realistische Verteilung der Abflüsse in der Ems zu erzielen.

Der modellierte Zeitraum beträgt 28 Tage, was zwei Nipp-Springtidezyklen entspricht. Die Berechnung wird mit einem bereits dynamisch eingeschwungenen, berechneten Zustand des Systems gestartet. Dies betrifft die Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte.



Als seeseitige Randbedingung wird die gemessene Wasserstandszeitreihe des Pegels Borkum Fischerbalje verwendet, aus dem Zeitraum 24.03.2010 – 25.04.2010 für die Validierung und 28.06.2010 – 28.07.2010 für die Variantenstudien.

Am landseitigen Modellrand der Ems in Bollingerfähr wird die Berechnung über Abflüsse gesteuert. Hierbei werden für den Auswertez Zeitraum jeweils konstante Werte vorgegeben. Die Vergleichsrechnungen mit/ohne Tidesteuerung werden hierbei mit einem konstanten Oberwasserzufluss von 50 m<sup>3</sup>/s angesetzt. Soweit hiervon abweichende Abflüsse verwendet werden, sind diese mit den Ergebnisdarstellungen dokumentiert.

Der Salzgehalt am seeseitigen Modellrand wird über den Untersuchungszeitraum als konstant angenommen und ist mit einem Wert von 31 PSU angesetzt. Die Verteilung des Salzgehaltes im Modellgebiet zum Berechnungsbeginn (Anfangsbedingung) ist das Ergebnis einer im Vorhinein durchgeführten dynamischen Einrechnung.

Für die Turbulenzschließung ist ein Mischungswegansatz mit einer Dämpfungsfunktion nach Perels und Karelse (1982) implementiert (Oberrecht & Wurpts 2014), um die vertikalen Salzgehaltsgradienten während der Stauwasserphasen, das großräumige barokline Zirkulationsmuster und die Turbulenzsituation im Ästuar reproduzieren zu können (siehe Kapitel 4.1).

Das hydrodynamische Modell berücksichtigt über den Dichteunterschied und die Dämpfung der Turbulenz einen Einfluss suspendierter Sedimente auf die Strömung

### 3.3. Tidesteuerungsansatz

Die Tidesteuerung wirkt im Wesentlichen durch die temporäre Reduzierung des im Bauwerk durchströmten Querschnitts mittels partiellen Absenkens der einzelnen Hubtore.

Zur Berücksichtigung eines spezifischen, zeitabhängigen Betriebsmodus für die Verschlussorgane des Emssperrwerks ist im Modell ein zusätzlicher Verlustterm in die Impulsbilanzgleichung implementiert.

Dieser erlaubt mit guter Näherung die dynamische Berechnung der lokalen Energieverluste infolge der Unterströmung der Hubschütze im verwendeten Modell (s.a. Kapitel 4.2).

Die Formulierung wurde anhand der Messdaten aus den Naturversuchen 2009 und 2012 validiert.

Die Implementierung im Modell weist alle Freiheitsgrade der realen Tidesteuerung auf, d.h. es können alle Sperrwerksöffnungen unabhängig voneinander im zeitlichen Verlauf beliebig bewegt werden.

Das Modell ist damit in der Lage, die Wirkung der Sperrwerkssteuerung belastbar für die im Rahmen der Fragestellung zu untersuchenden Verbaugrade und Steuerungsszenarien zu berechnen (s.a. Kapitel 4.2).

### 3.4. Sedimenttransport- und morphodynamischer Ansatz

Das zu beschreibende System weist einige physikalische Eigenheiten auf, die mit der gegenwärtig verfügbaren Modelltechnik nur mit erheblichen Unsicherheiten berechnet werden können. Hierzu zählen:

- die erhebliche Variation der bindigen Feinstoffanteile im Sohl sediment,
- die in großer Menge in der Wassersäule insbesondere der Unterems suspendierten Feinsedimente bis hin zu Flüssigschluff,
- das komplexe Absetz- und Erosionsverhalten selbiger sowie
- die weitreichende Interaktion der Sedimente mit der Strömung, die eine klare Trennung von Wasser- und Bodenkörper über weite Strecken unmöglich macht.

Um diese Phänomene und ihre Reaktion auf den Tidesteuerungsbetrieb abschätzen zu können, wird das Modellsystem in der nachfolgend beschriebenen Form konfiguriert und eingesetzt.

#### 3.4.1. Fraktionierung, Sinkgeschwindigkeiten, Erosion und Deposition

Das im Modellgebiet verfügbare Sediment wird durch acht sandige und eine Schlufffraktion beschrieben. Die Klassen setzen sich hierbei zusammen aus Schluff und Sand der Korndurchmesser 63  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$  und 800  $\mu\text{m}$ .

Sinkgeschwindigkeiten der sandigen Sedimente werden nach van Rijn (1993) berechnet. Das Absinkverhalten der Schlufffraktion wird durch einen Ansatz beschrieben, der die Phänomene der Flockenbildung und des behinderten Absinkens berücksichtigt (van Rijn 1993). Aus diesem Grund wird für den Schluff keine Korngröße definiert, da diese aufgrund der komplexen Aggregationsprozesse nicht sinnvoll festgelegt werden kann.

Die Zahl der Sandfraktionen erlaubt die Berücksichtigung von Korn-Korn-Interaktionen im Sinne von Abschattungs- und Expositionseffekten (Ashida & Michiue, 1974).

Das Erosionsverhalten der sandigen Sedimente wird mit der Transportformulierung nach van Rijn (2004) modelliert. Diese verwendet eine Parametrisierung des Bewegungsbeginns nach Shields (van Rijn, 1993).

Das Erosionsverhalten gemischter kohäsiver und nicht-kohäsiver Sedimente ist durch eine Formulierung nach van Ledden (2003) und van Kessel (2002) realisiert. Hierbei nimmt der für Erosion maßgebliche Schwellenwert mit zunehmendem Schluffanteil sukzessive zu (van Rijn, 1993).

Die Erosionsrate wird hierbei nach Partheniades-Krone berechnet (Partheniades, 1965). Die kritische Schubspannung für den Bewegungs-/Erosionsbeginn wird in diesem Bereich ebenfalls in Abhängigkeit des Schluffanteils berechnet, basierend auf Messungen von Le Hir (2005).

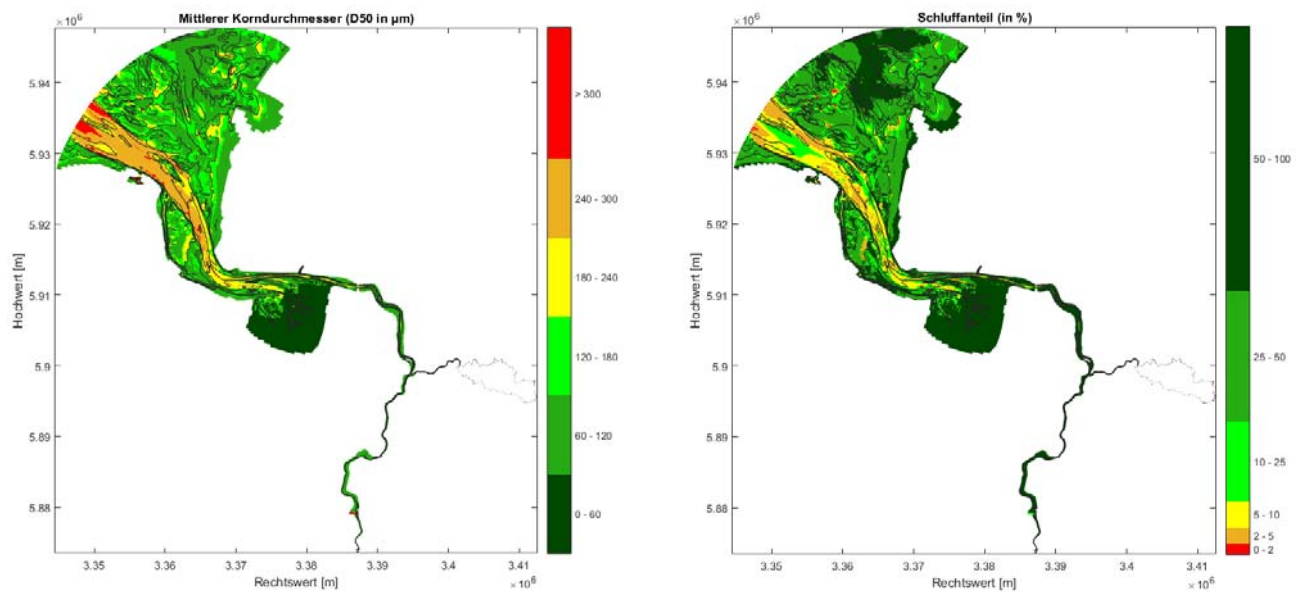
Des Weiteren berücksichtigen die Modellrechnungen den Hangabwärtstrieb auf längs- und quergeneigter Sohle nach Bagnold (Bagnold, 1966 und van Rijn, 1993).

### 3.4.2. Zusammensetzung des Bodenmodells

Für den Aufbau des Bodenmodells wurden verschiedene Quellen herangezogen, die zunächst miteinander verschnitten und anschließend auf das Berechnungsgitter interpoliert worden sind.

Vor Beginn der eigentlichen Berechnungsläufe wurden diese Verteilungen bei festgehaltener Sohlentwicklung durch das morphodynamische Modell solange eingerechnet, bis in repräsentativen Bereichen der Gewässersohle ein dynamisches Gleichgewicht erreicht war. Dieser Arbeitsschritt stellt zunächst sicher, dass die später ausgewerteten Modellrechnungen keine Einflüsse aus Ungenauigkeiten der Eingangsdaten, Diskretisierungseffekten etc. mehr aufweisen.

Als Eingangsdaten für den Aufbau des Bodenmodells wurden Daten aus MCLAREN, P. et al. (1998), Meyer & Ragutzki (1999) und der niedersächsischen Sublitoralkartierung verwendet. Abbildung 13 zeigt die aus der Einrechnung resultierende Verteilung der verschiedenen Sedimentklassen/Korndurchmesser im Modellgebiet.



**Abbildung 13:** Eingerechnete Verteilung des Sohlsubstrats in der obersten Schicht des Bodenmodells. Zum Vergleich siehe auch Abbildung 8.

Zur Berücksichtigung der Sedimentzusammensetzung des Bodenmodells im Bereich der Unterems wurden Messdaten von einem Mehrfrequenzecholot und Sedimentecholot, sowie Sedimentproben (Frahmplot) ausgewertet. Die Messdaten des Sedimentecholotes zeigen eine bis zu zwei Metern mächtige und stabile Schicht direkt unterhalb der Gewässersohle, die ortsvariabel einen Schluff-/Ton-Anteil in der Größenordnung von 70 % aufweist.

Unterhalb der in Abbildung 13 dargestellten schluffhaltigen Schicht befindet sich der natürlich anstehende Bodenkörper, der im morphodynamischen Modell aus bestehenden Kernbohrungen der WSV sowie unter Hinzunahme von Informationen aus der geologischen Grundkarte Niedersachsen (LBEG) hinsichtlich der Lage der Holozänbasis aufgebaut ist.

## 4. Modellvalidierung

Die Modellvalidierung dient der Überprüfung der in der Kalibrierung getroffenen Annahmen hinsichtlich der dort variierten Parameter. Hierzu werden Berechnungsergebnisse mit Messwerten aus dem durch die Berechnung abgedeckten Zeitraum verglichen. Die Messwerte dürfen deswegen zuvor nicht in die Kalibrierung eingeflossen sein.

### 4.1. Hydrodynamik

Üblicherweise wird die Hydrodynamik anhand von Wasserspiegellagen und –soweit solche vorliegen– Strömungsgeschwindigkeiten validiert. In Tabelle 1 ist der Vergleich gemessener und berechneter Wasserstände anhand tabellierter Werte für die Tidehochwasser (Thw), Tideniedrigwasser (Tnw) und den Tidehub (Thb) dargestellt.

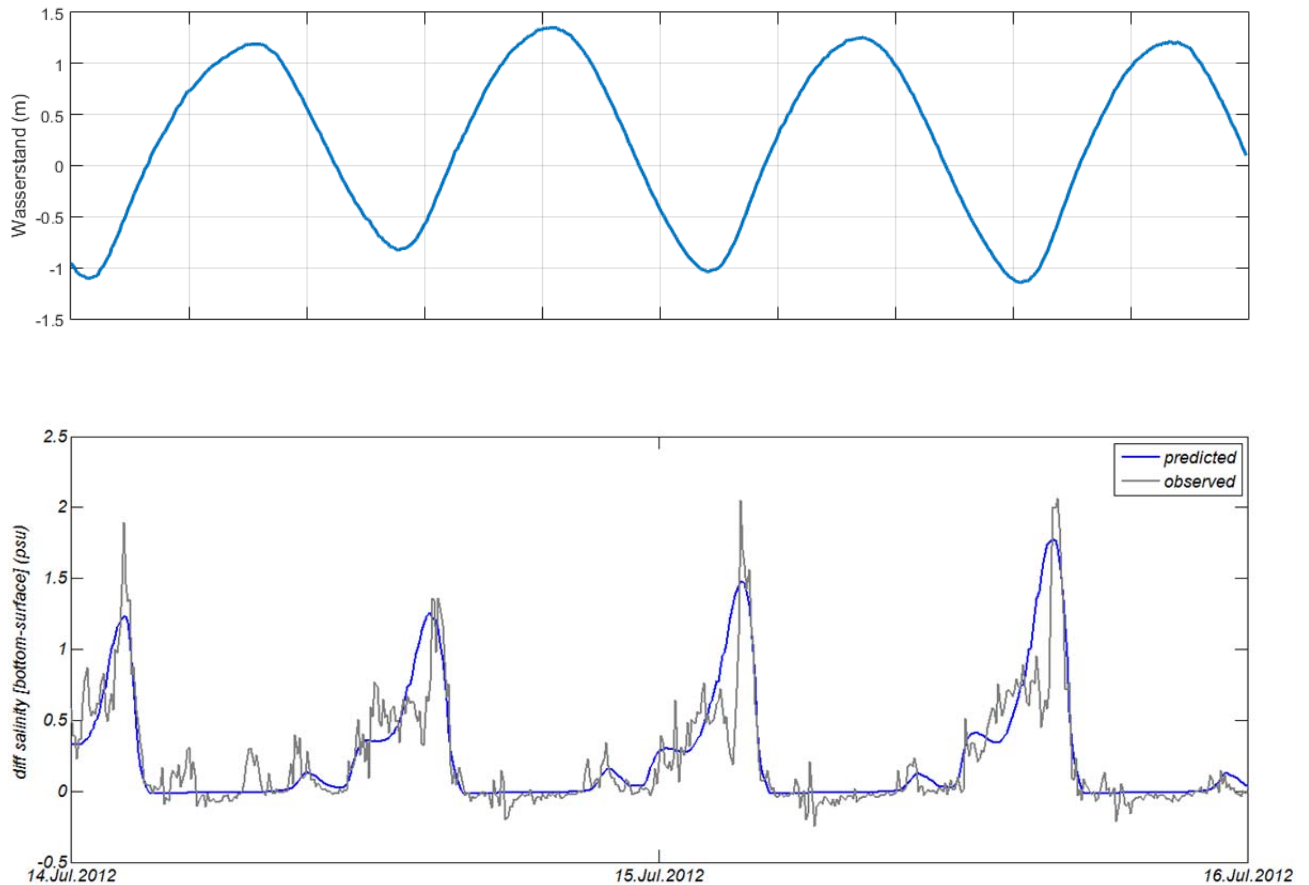
**Tabelle 1:** Vergleich gemessener und berechneter Tidescheitelwerte und -hübe

	THW [m NHN]			TNW [m NHN]			THB [m NHN]		
	Messung	Modell	Diff	Messung	Modell	Diff	Messung	Modell	Diff
Borkum F-Balje	1,18	1,19	-0,02	-1,31	-1,36	0,05	2,48	2,55	-0,07
Emshörn	1,23	1,21	0,01	-1,41	-1,41	0,00	2,64	2,63	0,01
Dukegat	1,24	1,28	-0,03	-1,50	-1,53	0,03	2,74	2,80	-0,06
Knock	1,37	1,33	0,04	-1,70	-1,72	0,02	3,07	3,05	0,02
Emden	1,45	1,42	0,03	-1,89	-1,85	-0,04	3,34	3,27	0,07
Pogum	1,51	1,44	0,06	-1,86	-1,80	-0,06	3,37	3,25	0,12
Terborg	1,63	1,57	0,06	-1,81	-1,83	0,02	3,44	3,40	0,04
Leerort	1,75	1,68	0,07	-1,88	-1,80	-0,08	3,63	3,47	0,15
Weener	1,81	1,76	0,05	-1,89	-1,81	-0,08	3,70	3,56	0,13
Papenburg	1,84	1,78	0,06	-1,86	-1,82	-0,04	3,71	3,61	0,10

Das Modell ist in der Lage, die großräumige Tidedynamik hinreichend bezüglich der vorliegenden Untersuchung zu reproduzieren.

Ein weiteres wesentliches Kriterium für die modelltechnische Abbildung der salzgehaltsgetriebenen baroklinen Dichteschichtung im Bereich der Unterems ist die Salzgehaltsdifferenz zwischen Sohle und Oberfläche am Eingang ins Emders Fahrwasser. Diese nimmt jeweils um die Stromkenterung zur Flut hin ein Maximum an, dessen Absolutwert die maximale Schichtungsintensität im weiteren Verlauf in die Unterems determiniert (Oberrecht & Wurpts, 2014). Mit Blick auf die große Sensitivität der Schwebstofftransporte in der Unterems für die dortigen baroklinen Effekte, kommt der validen Berechnung der Salzgehalte eine zentrale Bedeutung zu.

Zur Überprüfung der Ergebnisqualität liegen Messdaten der WSV für eine Anordnung mehrerer, übereinander angeordneter Leitfähigkeitsmessstellen bei Messposition „Fahrwassertonne 61“ im seeseitigen Eingang zum Emders Fahrwasser vor. Die Differenz zwischen Sohle und Oberfläche, wie sie sich aus den Messungen und den Modellrechnungen ergibt, zeigt Abbildung 14.

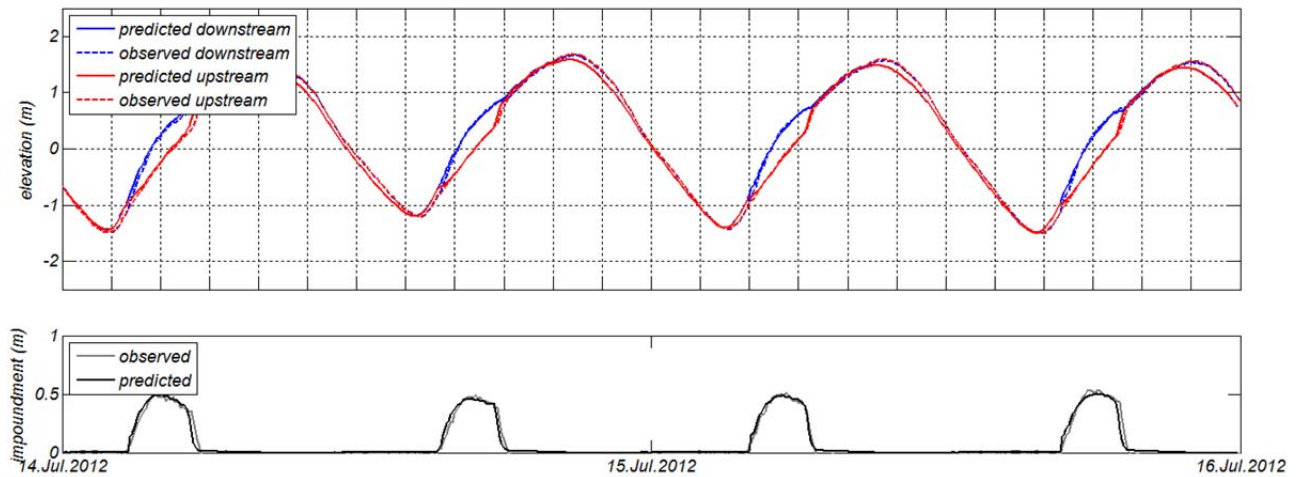


**Abbildung 14:** Vergleich gemessener und berechneter Salzgehaltsdifferenzen am Eingang in die Unterems im Emder Fahrwasser (Position bei Fahrwassertonne 61) über den Tidezyklus.

#### 4.2. Tidesteuerung

Zur Berücksichtigung der Tidesteuerung im hier verwendeten Modellverfahren wurde eine Erweiterung des Programmcodes zur Berücksichtigung zusätzlicher lokaler Energieverluste als Folge der Bauwerksdurchströmung implementiert. Diese ist erforderlich, um den korrekten zeitlichen Verlauf des Durchflusses und damit einhergehenden Aufstaus am Emssperrwerk während des Tidesteuerungsbetriebes zu berechnen. Ebenso wurde die Möglichkeit geschaffen, beliebige Steuerungsszenarien im Modell einzusteuern.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen Vergleich des berechneten und gemessenen Aufstaus für den Naturversuch von 2012 (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Das obere Diagramm zeigt den Vergleich zwischen den Zeitreihen gemessener und modellierter Wasserspiegelauslenkung während der Versuchsreihe 2012 in Gandersum. Im unteren Diagramm sind die entsprechenden Wasserstandsdifferenzen zwischen Sperwerksposition im Oberwasser (upstream) und im Unterwasser (downstream) als Vergleich von Messung und Modellierung dargestellt

Mit dem Berechnungsansatz für den Energieverlust infolge der Unterströmung der Hubtore gelingt mit dem auf der Flachwassergleichung basierenden Modell eine ausreichende Reproduktion des Einflusses der Verschlussorgane.

Damit ist eine hinreichende Genauigkeit zur Berücksichtigung der Dämpfung der großräumigen Tidedynamik aufgrund des Betriebs der Sperrwerkstore gegeben.

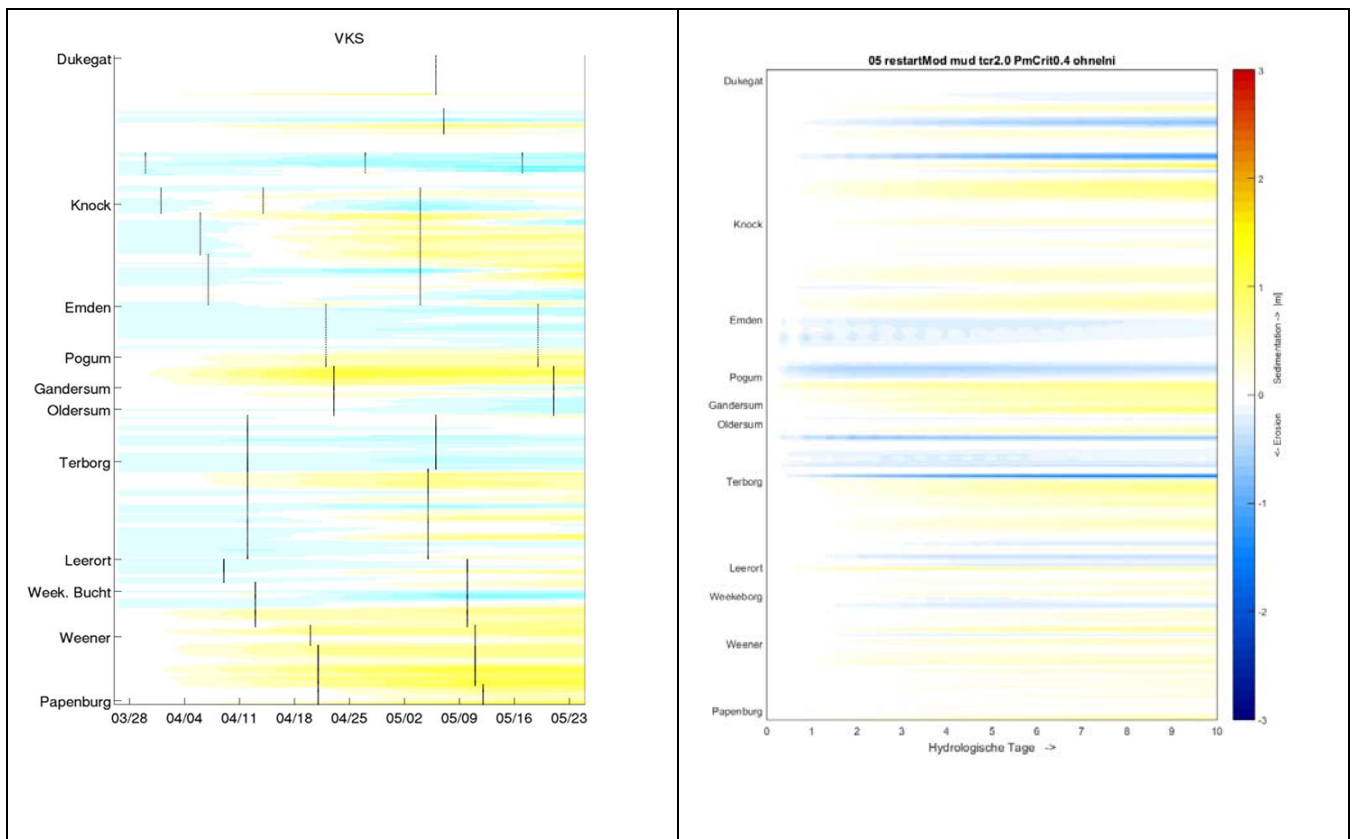
#### 4.3. Schwebstoffe und Morphodynamik

Im Bereich der morphodynamischen Modellierung liegen nur selten ausreichend genaue Messdaten vor, um anhand dieser eine unmittelbare quantitative Validierung durchführen zu können.

Nachfolgend wird eine qualitative Validierung und Plausibilisierung von Modellergebnissen durchgeführt anhand verschiedener Messdaten. Diese können durch den gewählten Ansatz grundsätzlich nicht 1:1 getroffen werden, jedoch soll die grundsätzliche, qualitative Richtigkeit der Modellrechnungen bestätigt werden.

Soweit die qualitative Aussagekraft des Modells als hinreichend beurteilt wird, können Abweichungen zwischen Messung und Modell in der späteren Ergebnisauswertung dadurch kompensiert werden, dass im weiteren Verlauf der Studie stets Vergleiche zwischen zwei mit dem validierten System modellierten Zuständen (Referenzzustand, TSB) gebildet werden.

Eingangs sei auf die hier nicht separat dargestellte gute Übereinstimmung zwischen der mit dem Modell eingerechneten Verteilung des Sohls substrats im Modellgebiet (Abbildung 13) und der aus Messungen ermittelten Verteilung (Abbildung 8) verwiesen. Diese ist, weil die berechnete Sedimentzusammensetzung ein integratives Ergebnis aus Strömungsintensität, Sedimentvorgabe und Modellannahmen verkörpert, ein belastbarer Indikator dafür, dass die großräumige Systemdynamik hinreichend realistisch abgebildet wird.



**Abbildung 16:** Vergleichende Darstellung der morphologischen Entwicklung (gelb: Sedimentation, blau: Erosion) im Längsverlauf mit dem Ziel einer qualitativen Validierung der morphodynamischen Eignung des Modells. Die Messung zeigt eine Auswertung der VKS Längspeilungen des Fahrwassers durch das WSA Emden für einen Zeitraum von etwa zwei Monaten im Frühjahr 2010, in denen keine Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt wurden (Auswertung der VKS entsprechend FTZ Westküste 2014). Eine direkte Vergleichbarkeit ist nicht gegeben, da die Modellrechnung unter konstantem Oberwasserzufluss von  $25\text{m}^3/\text{s}$  berechnet wurde. Damit korrespondiert sie etwa mit dem hinteren Drittel des Messzeitraumes.

Der in Abbildung 16 dargestellte Vergleich bestätigt die qualitativ gute Entsprechung der morphologischen Rechnung mit den Messungen. Er dient dazu, einen Eindruck von der morphologischen Aussagekraft des Modells im Rahmen der Modellkonfiguration zu beschreiben. Die morphologische Entwicklung ist hierbei als integrales Ergebnis des Modells zu verstehen, da sie die Gesamtwirkung des durch die Strömung getriebenen Sedimenttransports entsprechend der hydrodynamischen und sedimentologischen Modellkonfiguration und -annahmen zeigt.

Ein weiterer Nachweis der Modelleignung ergibt sich aus dem morphologischen Verhalten, das für exemplarische Querschnitte im Übergangsbereich in die Flüssigschlickzone dargestellt wird. Hierbei geht es ergänzend zur morphologischen Entwicklung im Längsverlauf (Abbildung 16) darum, die Qualität des Bodenmodells und der Einrechnung der Sedimente in der obersten Bodenschicht (3.4.2) zu verifizieren. Ausschlaggebend ist die Beibehaltung der grundsätzlichen Querschnittsform, wie sie in der Natur existiert und als Anfangsbedingung der morphodynamischen Berechnung verwendet worden ist.

Die berechneten Änderungen der Sohle weisen die für morphodynamische Modellrechnungen übliche Glättung der Querschnitte auf, jedoch kommt es nicht zu wesentlichen Veränderungen wie Rinnenverlagerung, Verflachung von Seitenbereichen etc.

Das Modell ist geeignet, Aussagen über die kurzfristige morphologische Reaktion der Tideems auf den Tidesteuerungsbetrieb zu untersuchen. Die im Abschnitt 0 einleitend umrissenen Ein-

schränkungen hinsichtlich der Berücksichtigung des Flüssigschlicks sind hierbei weiterhin gegeben.

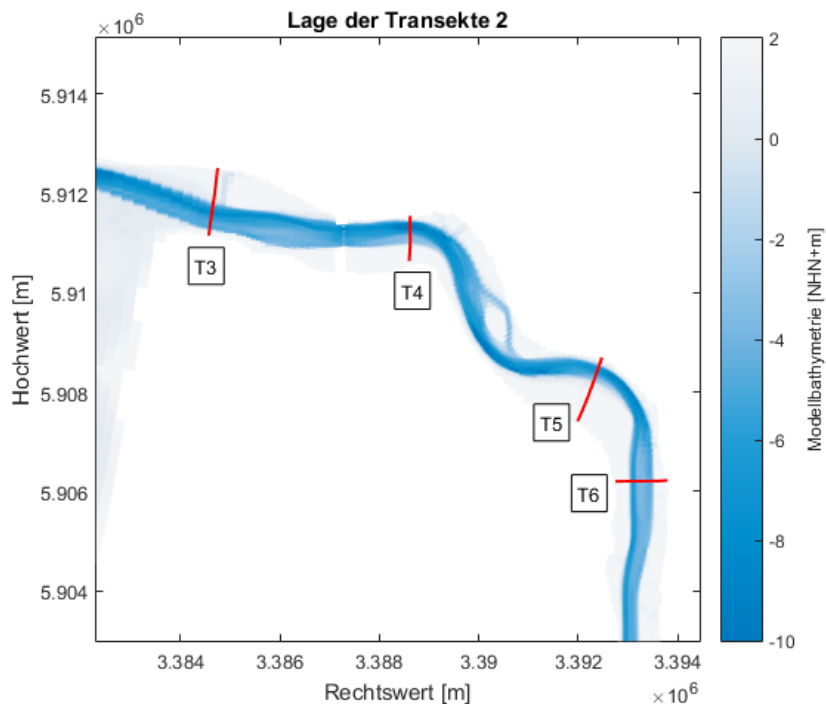


Abbildung 17: Lage der in Abbildung 18 dargestellten Querschnitte.

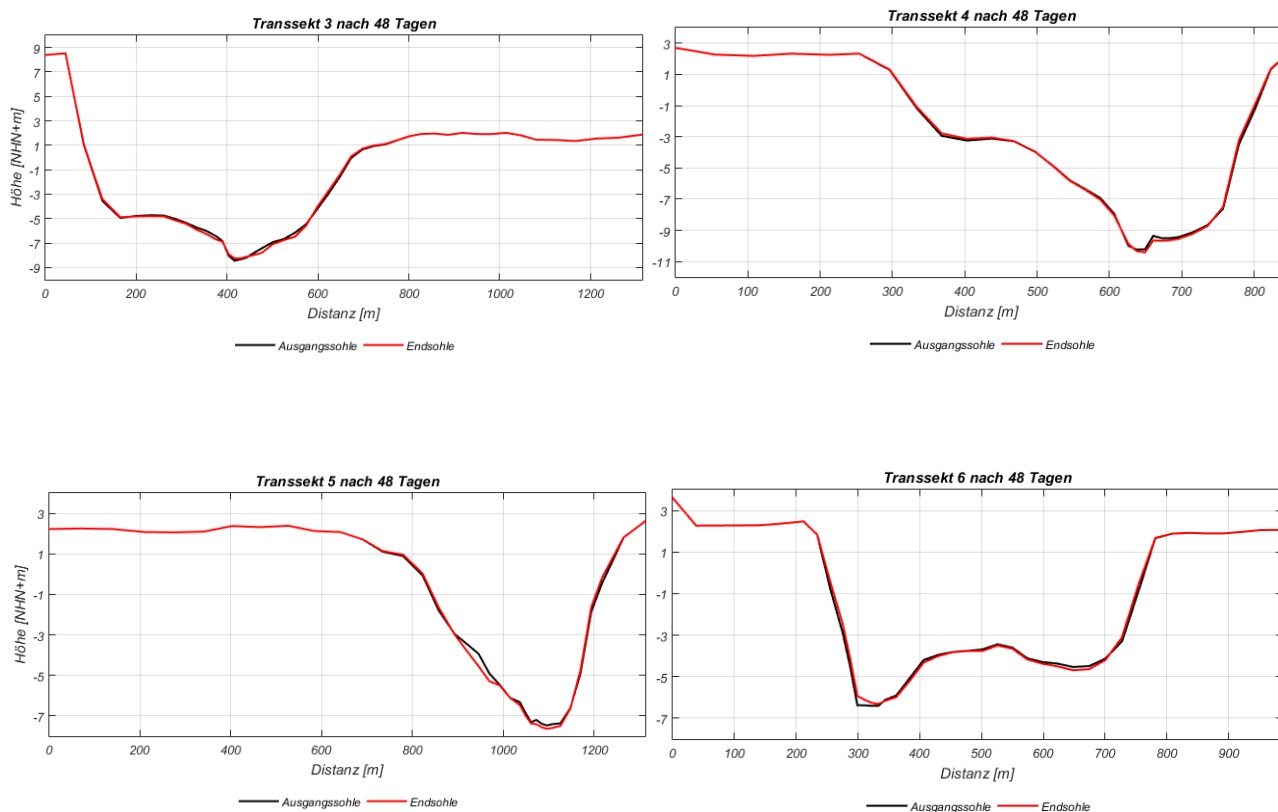


Abbildung 18: Berechnete kurzfristige (48 Tage) morphologische Entwicklung der in Abbildung 17 dargestellten exemplarischen Querschnitte im Übergangsbereich in die Flüssigschlickzone.



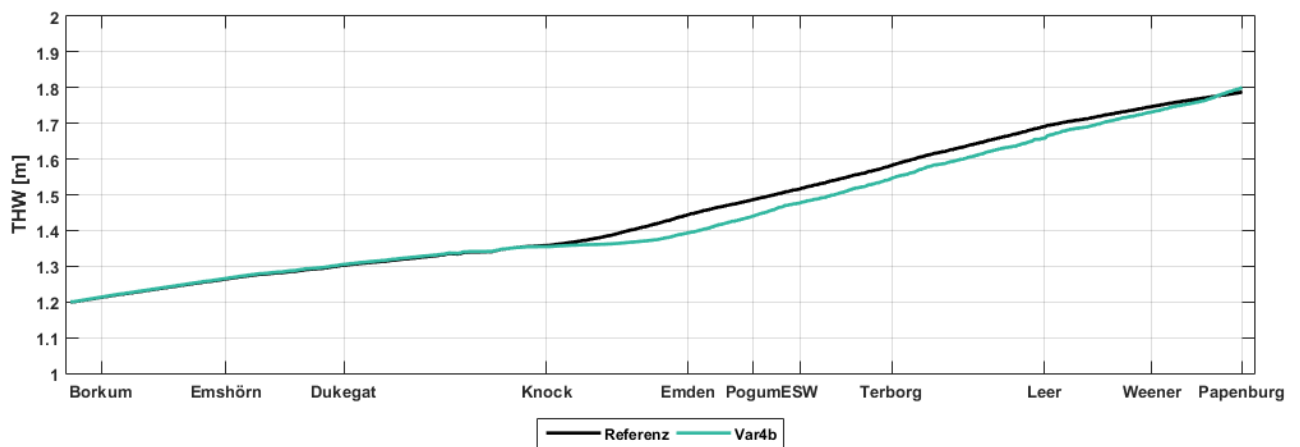
## 5. Berechnungsergebnisse Hydrodynamik und Salzgehalte

Nachfolgend werden jeweils die Berechnungsergebnisse für den Referenzzustand und den untersuchten Tidesteuerungsfall vergleichend für den Längsschnitt dargestellt. Es handelt sich hierbei um querschnittsgemittelte Werte die über zwei Spring-Nipp-Zyklen ausgewertet sind.

### 5.1. Beeinflussung der Gezeitendynamik

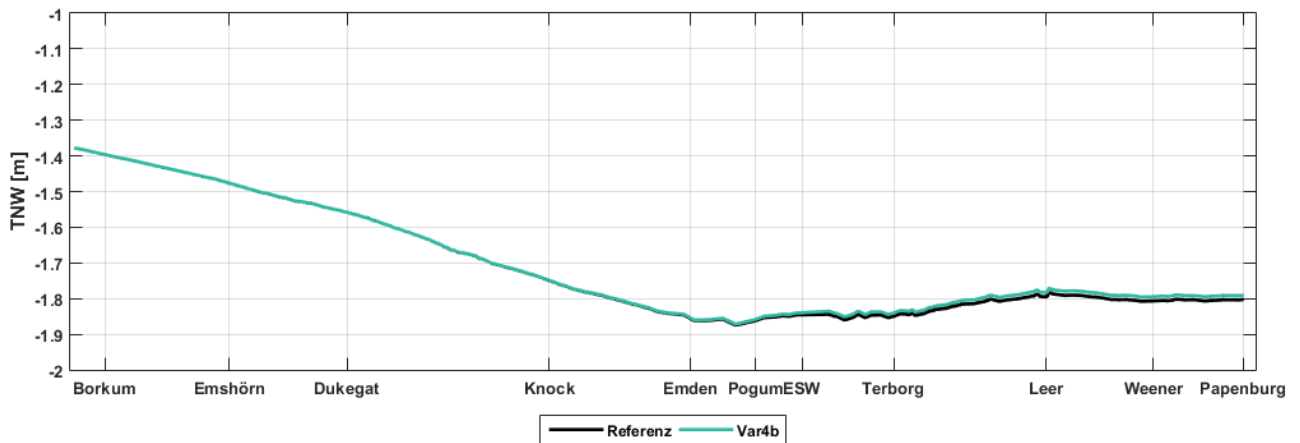
Abbildung 19 bis Abbildung 21 zeigen die Beeinflussung der Tidehoch- und Niedrigwasser durch den untersuchten Tidesteuerungsbetrieb sowie den resultierenden Tidehub.

Es wird deutlich, dass die Beeinflussung der Wasserstände seeseitig bis zum Übergang von der Außenems ins Emders Fahrwasser reicht.



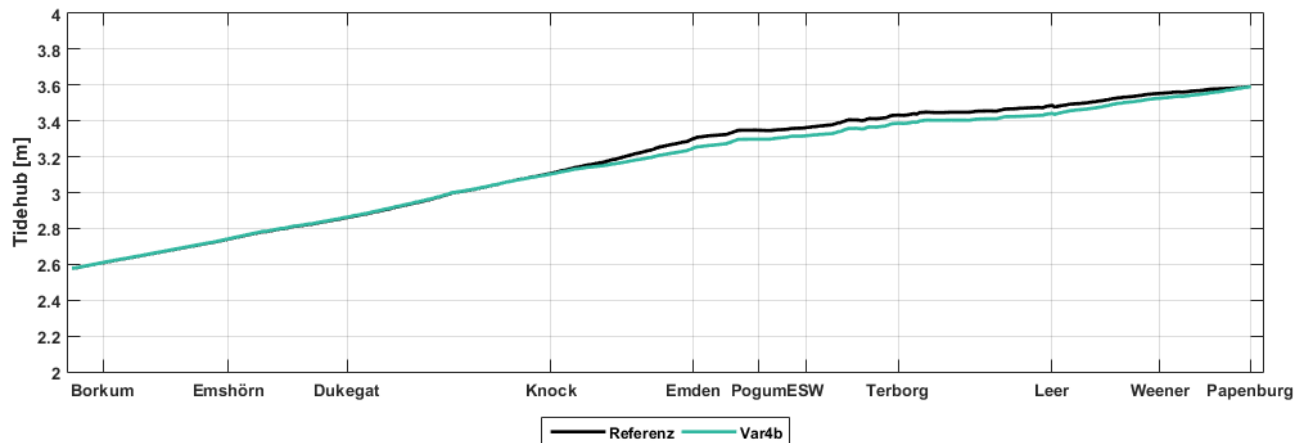
**Abbildung 19:** Beeinflussung des Tidehochwassers (Thw) durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).

Die Tidehochwasser werden durch den Tidesteuerungsbetrieb in der Größenordnung einiger cm abgesenkt. Der Einflussbereich des TSB auf die Thw reicht bis etwa zur Knock und weist eine maximale Absenkung von etwa 5cm im Bereich des Emders Fahrwassers bei Emden auf. Diese nimmt in Richtung oberstrom stetig ab und geht kurz vor Papenburg in eine leichte Erhöhung des Thw über, deren Maximum mit etwa 2 cm bei Herbrum zu verzeichnen ist.



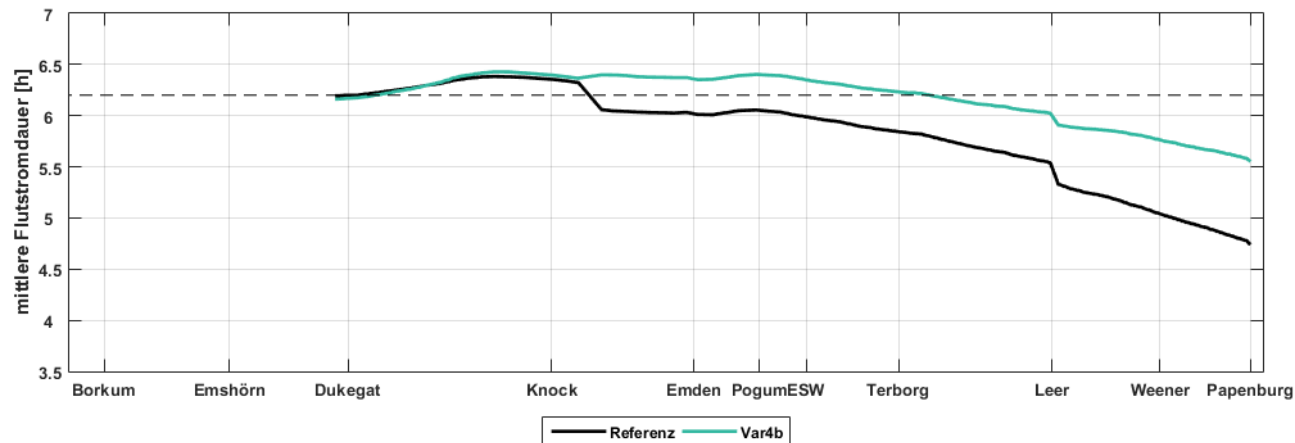
**Abbildung 20:** Beeinflussung des Tideniedrigwassers (Tnw) durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).

Das in Abbildung 20 dargestellte Tnw wird durch die Tidesteuerung in der Größenordnung bis etwa 2cm angehoben oberhalb des Emssperrwerkes. Abbildung 21 zeigt den als Differenz der beiden vorangegangenen Kurven definierten Tidehub, der entsprechend von der Knock an stetig zunimmt bis Emden und von dort bis etwa Terborg die maximale Reduzierung um etwa 7cm aufweist, die weiter nach Oberstrom stetig wieder abnimmt und in Papenburg auf den Referenzzustand abgeklungen ist.



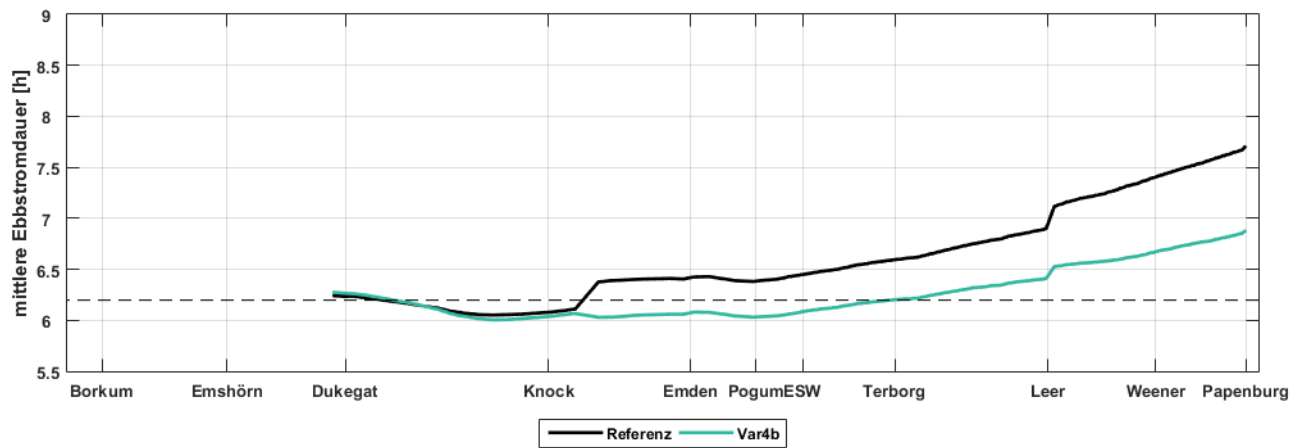
**Abbildung 21:** Beeinflussung des Tidehubs durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).

Die in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellten Gezeitendauern können als Indikator für die Tideasymmetrie herangezogen werden. Die Abbildungen zeigen die Flut- und Ebbstromdauern, berechnet anhand der querschnittsgemittelten Abflüsse.



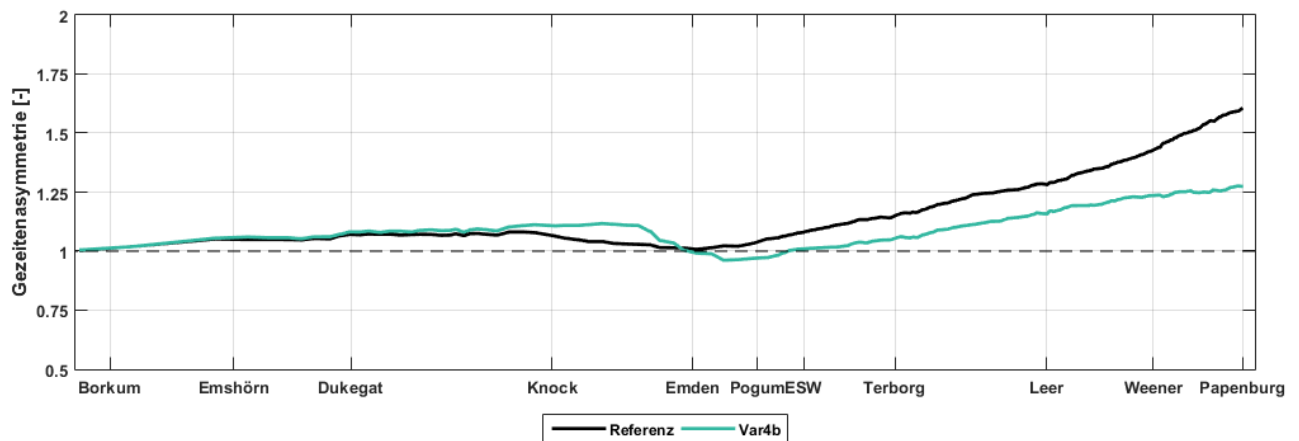
**Abbildung 22:** Beeinflussung der Flutstromdauer durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).

Es wird deutlich, dass die Tidesteuerung die Flut (Abbildung 22) im gesamten Einflussbereich ab der Knock landeinwärts verlängert, während die Ebbphase (Abbildung 23) entsprechend verkürzt wird.



**Abbildung 23:** Beeinflussung der Ebbstromdauer durch den Tidesteuerungsbetrieb (grüne Linie).

Der in Abbildung 24 dargestellte Quotient dieser Größen wird als Tideasymmetrie bezeichnet. Werte größer eins sind hierbei als Indikator für stromaufgerichtete Transporte zu verstehen, solche kleiner eins als Indikator für seewärts gerichtete Transporte.

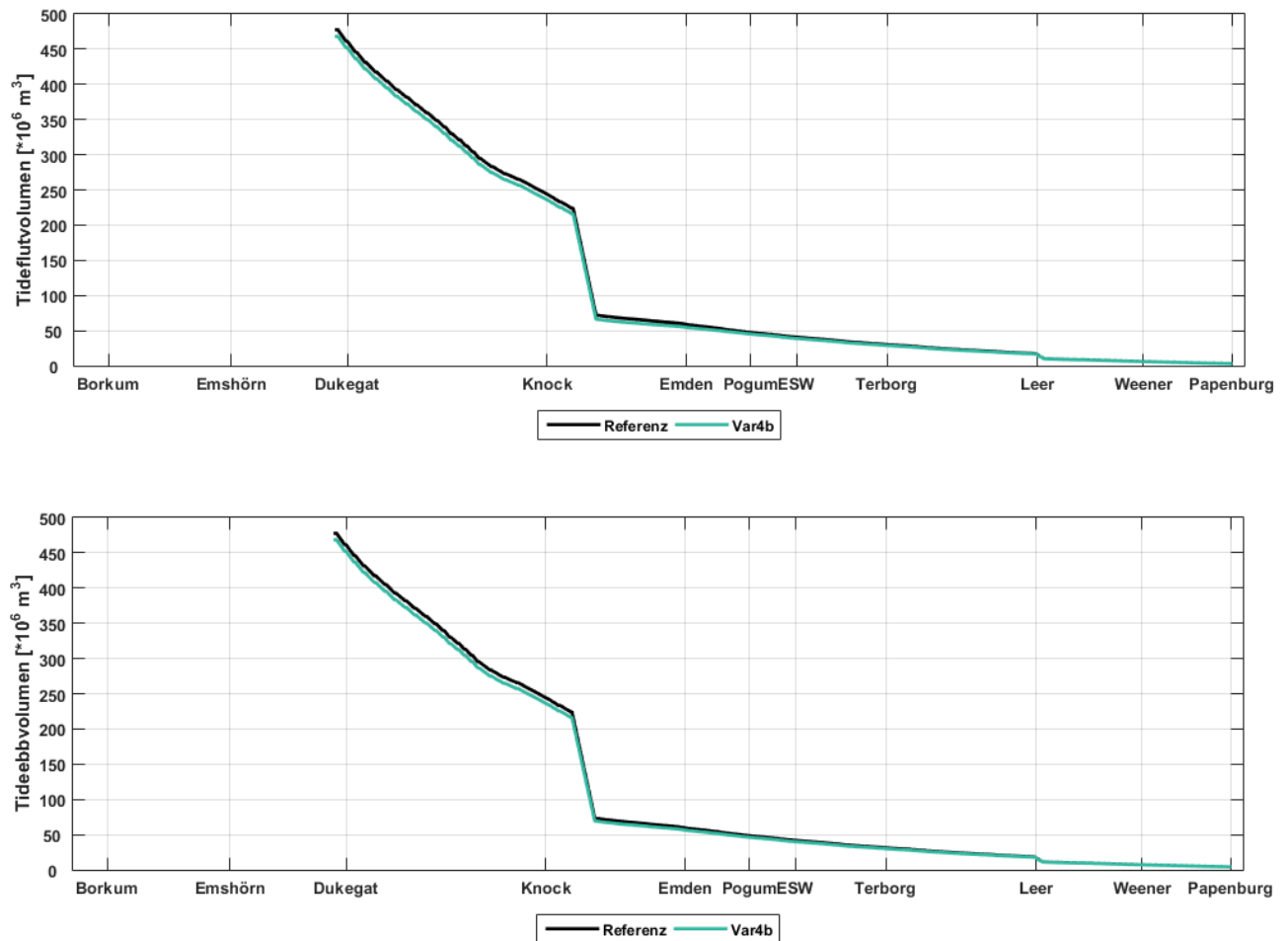


**Abbildung 24:** Auswertung der Gezeitenasymmetrie anhand des Verhältnisses von Flut – und Ebbstromdauer.

Es wird deutlich, dass die Tidesteuerung die Gezeitenasymmetrie im Bereich landeinwärts Emdens reduziert. Im Emdener Fahrwasser bis etwa zur Knock findet eine Vergrößerung der Gezeitenasymmetrie statt. Diese wirkt sich mit Blick auf die Sedimenttransporte gleichwohl nicht verschlechternd aus.

## 5.2. Beeinflussung der Tidevolumina

Das Tidevolumen beschreibt die kumulative Wirkung der Tidesteuerung, da es letztlich die kombinierten Auswirkungen veränderter Tidephasenlängen, Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegel über die Zeit beinhaltet.



**Abbildung 25:** Vergleichende Darstellung der Tidevolumina für den Referenzzustand und den Tidesteuerungsfall. Oben: Flutstromvolumen, unten: Ebbstromvolumen.

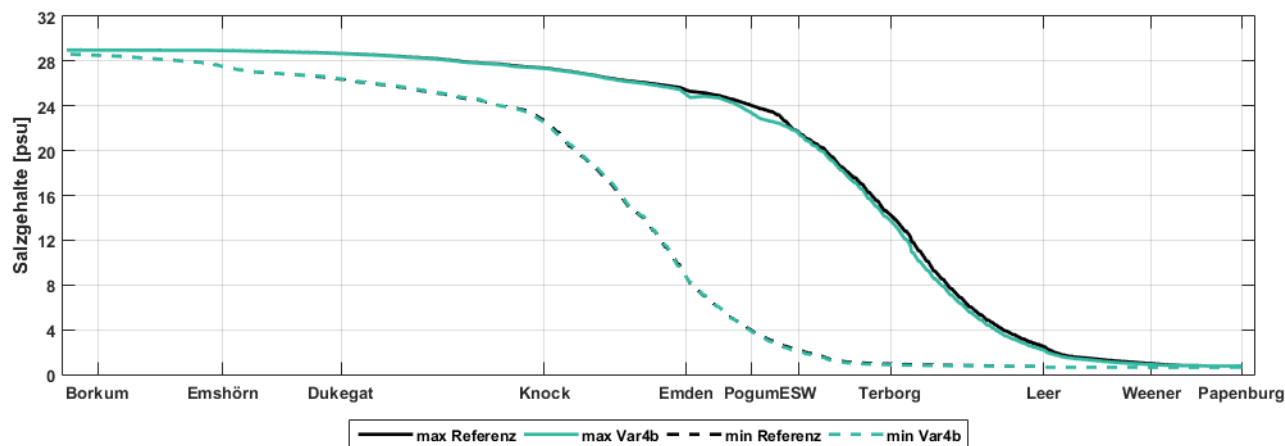
Es ist vorab der Durchführung morphodynamischer Modellrechnungen als Indikator zur qualitativen Abschätzung der langfristigen morphologischen Entwicklung geeignet.

Abbildung 25 zeigt in der oberen Abbildung das Flut- und in der unteren das Ebbstromtidevolumen. Diese unterscheiden sich durch die während beider Tidephasen vom Binnenland zufließende Frischwassermenge. Der Vergleich der Abbildungen zeigt, dass letztere gering ist im Verhältnis zu den gezeitenbedingten Austauschvolumina.

Da das Tidevolumen unmittelbaren Einfluss auf das Räumungsvermögen der Ebbströmung hat, ist das hier untersuchte Tidesteuerungsszenario (s. a. Abschnitte 2.4 und 3.3) vor dem Hintergrund der langfristigen morphologischen Stabilität der Maßnahme auf eine möglichst geringe Reduzierung des Tidevolumens optimiert. Im Falle signifikanter Reduzierung des Tidevolumens ist von verstärkter Sedimentation in den betroffenen Abschnitten auszugehen (siehe auch Anlage 03).

### 5.3. Beeinflussung der Salzgehalte

Die Salzgehalte reagieren aufgrund des nur geringfügig reduzierten Tidevolumens ebenfalls nur gering auf den Tidesteuerungsbetrieb. Es ist tendenziell eine leichte Abnahme der Salzgehalte von deutlich unter einem PSU über den gesamten Wirkungsbereich der Tidesteuerung zu verzeichnen (Abbildung 26).



**Abbildung 26:** Vergleichende Darstellung des Längsverlaufs der Salzgehaltsverteilung für Referenzfall und Tidesteuerungsbetrieb. Die gestrichelten Linien zeigen die minimalen Werte, die durchgehenden Linien die maximalen.

## 6. Sedimenttransport und Morphodynamik

Die Anwendung des in Abschnitt 3.4 beschriebenen Modells stößt in der Unterems an Grenzen, die durch die fehlende Berücksichtigung der Flüssigschlickdynamik gesetzt sind.

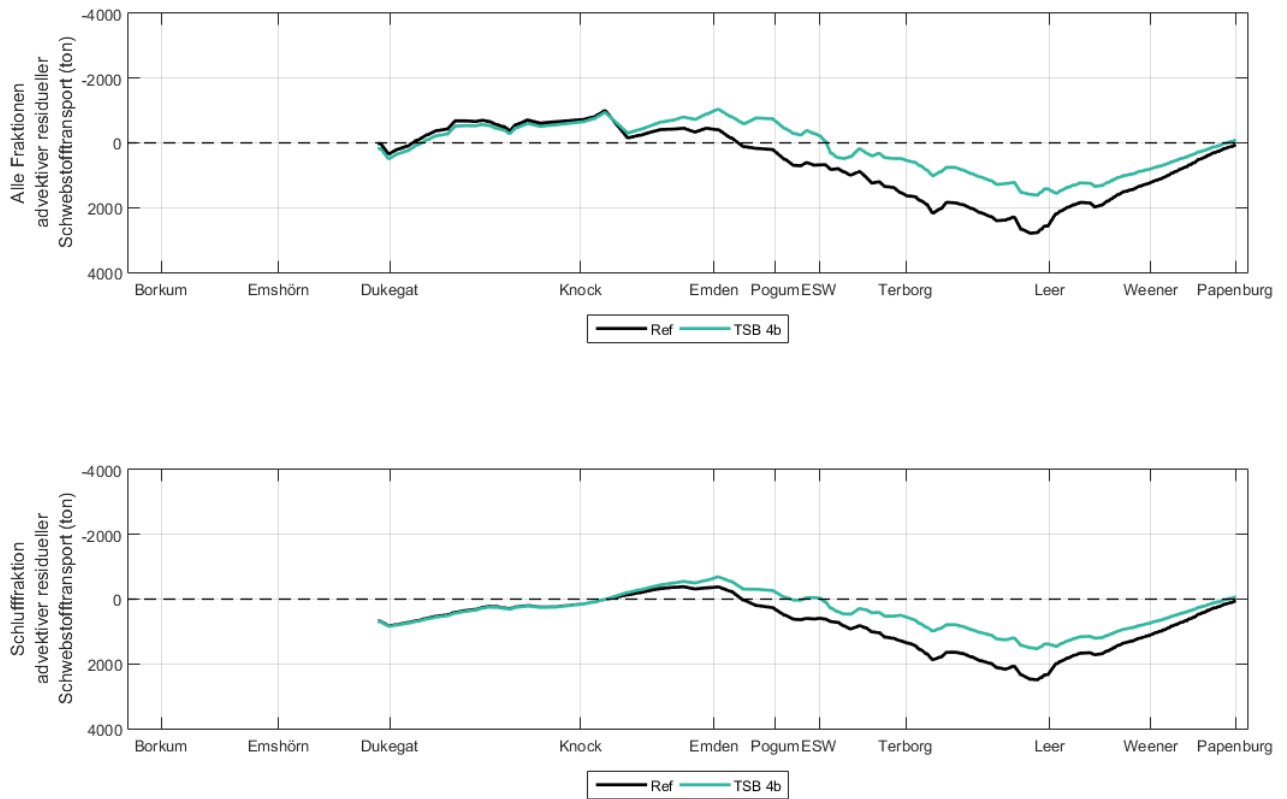
Diese Einschränkung ist der verwendeten Modelltechnik geschuldet, die zwar dem Stand der Technik entspricht und fachlich korrekt, basiert auf einer Vielzahl aufwendiger Naturmessungen konfiguriert ist, die aber das in der Unterems stark dominante Verhalten des Flüssigschlicks in wesentlichen Aspekten noch nicht abbilden kann.

Die nachfolgenden dargestellten Ergebnisse morphodynamischer Modellrechnungen zeigen aufgrund der nicht-Berücksichtigung des Flüssigschlicks letztlich einem hypothetischen Systemzustand, der sich qualitativ in einem Flüssigschlick-freien System in den ersten Wochen mit dem Beginn der Tidesteuerung einstellen würde.

Hierbei kann die langfristige morphologische Entwicklung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht berücksichtigt werden.

Mit Blick auf die in Verantwortung des Landes zu erstellende Machbarkeitsstudie werden derartige Einschränkungen im vorliegenden Gutachten bewusst in Kauf genommen und im Zusammenhang mit den jeweils dargestellten Berechnungsergebnissen erläutert, da hier zunächst die grundsätzliche Eignung der Tidesteuerungslösung und der Ausschluss solcher Nebeneffekte, welche eine spätere Umsetzung ggf. unmöglich machen würden, im Vordergrund stehen.

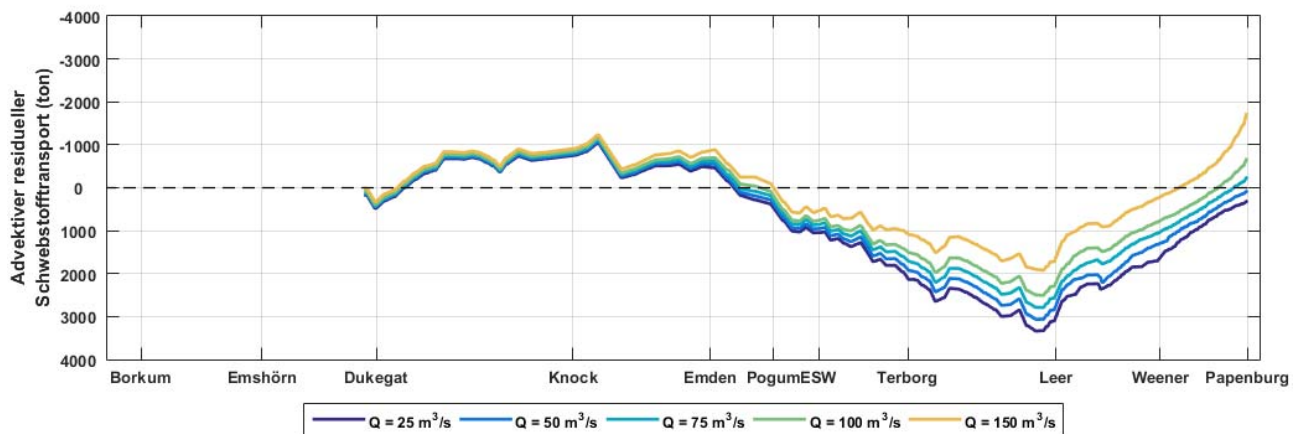
Abbildung 27 zeigt die residuellen Schwebstofftransporte unterschieden nach der Schlufffraktion alleine (untere Abbildung) und der Summe aller in Suspension transportierten Sedimente (obere Abbildung).



**Abbildung 27:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports (obere Abbildung) nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 50 m<sup>3</sup>/s. Die untere Abbildung zeigt die Auswertung der Schlufffraktion allein. Negative Werte bedeuten Transport nach seewärts.

Die Gesamtschwebstofftransporte variieren gegenüber der Schlufffraktion, da die hinzugenommenen sandigen Sedimente ein unterschiedliches und Bewegungsverhalten aufweisen.

Die Unterscheidung wurde vorgenommen, um einerseits eine Vergleichbarkeit zum Gutachten der WSV zur flexiblen Sohlschwelle zu gewährleisten und andererseits den gegenüber Sand deutlich mobilere Schluff als groben Indikator für die Beeinflussung des Flüssigschlicks heranziehen zu können.



**Abbildung 28:** Darstellung der residuellen Schwebstofftransports (Referenzfall) nach 14 Tagen Analysezeitraum für verschiedene Oberwassermengen. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.

Abbildung 28 zeigt die residuellen Schwebstofftransporte für verschiedene Oberwassermengen der Übersichtlichkeit halber nur für den Referenzfall. Die Ergebnisse bestätigen die grundsätzli-

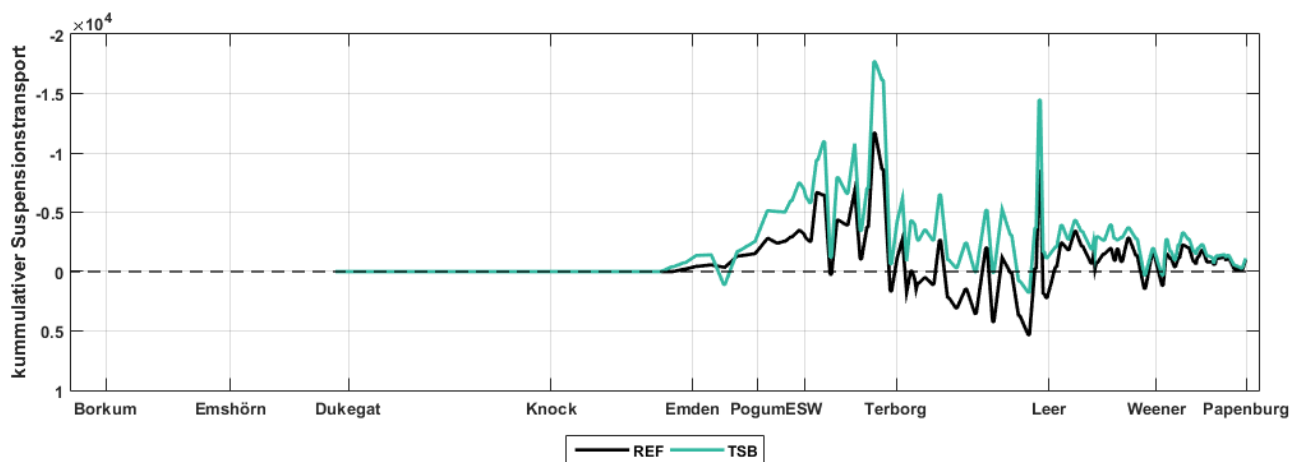
che Erkenntnis, dass höhere Oberwassermengen den seewärtigen Transport stärken bzw. den landeinwärts gerichteten Transport schwächen.

Der Vergleich für die variierten Oberwasserabflüsse mit den jeweiligen Tidesteuerungsfällen ist in Anlage 01 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine positive Wirkung im Sinne des seewärtigen Sedimenttransports des Tidesteuerungsbetriebes unabhängig von der Oberwassermenge gegeben ist.

Der NLWKN entwickelt im Rahmen seiner Aktivitäten zum Masterplan Ems2050 ein gekoppeltes hydro-morphodynamisches Modellsystem, das eine wesentlich verbesserte Berücksichtigung der Flüssigschlickdynamik ermöglicht und das die im Rahmen der Genehmigung notwendige Erstellung und Optimierung eines Betriebsplans stützen soll. Dieses ist derzeit in der Entwicklung, erlaubt aber bereits erste qualitative Abschätzungen der Wirkung des Flüssigschlicks auf die residuellen Schwebstofftransporte.

Zur Kurzbeschreibung und qualitativen Validierung des Ansatzes sei auf Anlage 04 verwiesen. Der Ansatz ist in der Lage, die dynamische Schichtung des Wasserkörpers abzubilden. Er wird für die in Abbildung 29 dargestellten Transporte auf einer ansonsten festen Gewässersohle betrieben.

Die nachfolgende Darstellung zeigt die mit dem Flüssigschlickmodell berechneten residuellen Schwebstofftransporte für einen Oberwasserabfluss von  $25\text{ m}^3/\text{s}$  bei festgehaltener Sohlentwicklung.



**Abbildung 29:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports bei einem konstanten Oberwasser von  $25\text{ m}^3/\text{s}$ . Die Berechnungen erfolgten mit einem Modellansatz, der die spezifischen Charakteristika des Flüssigschlicks berücksichtigt (s.a. Anlage 04). Negative Werte zeigen Stromauftransport an.

Die Ergebnisse sollten, analog zu denen in Abbildung 27 und Abbildung 28 nicht überinterpretiert werden, geben aber einen nach Stand von Wissenschaft und Technik deutlich besseren Eindruck von der Reaktion des Flüssigschlicks auf die Tidesteuerung. Sie ergänzen damit die vorhergehenden Aussagen.

Die in Abbildung 29 dargestellten netto Transporte zeigen für die Unterems deutlich einen in etwa ausgeglichenen Gesamttransport, der sich so auch mit realen Beobachtungen deckt. Dort belegen die Ergebnisse des Monitorings, dass in Phasen konstant niedriger Abflüsse auch das eingelagerte Flüssigschlickvolumen in erster Näherung konstant bleibt und nicht über das zu beobachtende Maß anwächst.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Verstärkung des seewärtigen Transports in Folge der Tidesteuerung für den Flüssigschlick in sehr viel höherem Maße gegeben ist als für die in der kohäsiven Sohle eingelagerten Sedimente.

Belastbare, auch quantitative Aussagen zu dieser Fragestellung sowie nach dem dauerhaften Verbleib des Materials werden von der neuen Modelltechnik nach Abschluss der derzeitigen Entwicklung erwartet und sollen in die Untersuchungen zur Betriebsplanung eingehen.

## **7. Zusammenfassung und Empfehlungen**

Im Rahmen der Aktivitäten zum Masterplan Ems2050 untersucht die Forschungsstelle Küste im NLWKN die Auswirkungen des durch das Land Niedersachsen verfolgten Tidesteuerungsansatzes auf die Hydro- und Morphodynamik der Ems. Dieser hat zum Ziel, den Sedimenttransport flussaufwärts nachhaltig einzudämmen und damit in der Tideems das Schlickproblem zu lösen sowie den Gewässerzustand zu verbessern.

Die Tidesteuerung am Emssperrwerk soll über die zeitweise Einschnürung des Querschnittes der Ems am Sperrwerk die Ausbreitung der Gezeitenwelle in die Unterems so beeinflussen, dass über die Reduzierung der Tideasymmetrie der resultierende Schwebstoffeintrag vermindert wird. Dabei soll das bisherige Tidevolumen soweit wie möglich erhalten werden, um die vorhandenen Querschnitte in der Unterems zu stützen.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind ein Zwischenstand dieser Aktivitäten anlässlich der Machbarkeitsstudie, die der Masterplan Ems2050 für die Lösungen Tidesteuerung und Sohlschwelle (untersucht durch die WSV) für das Ende des Jahres 2016 fordert.

Den dargestellten Untersuchungen vorausgegangen ist eine Variantenuntersuchung zur Identifikation der geeigneten Tidesteuerungsvariante. Hierbei wurde einerseits über variierte Verbaugrade und Steuerungsdauern eine Minimierung der Tidevolumenreduzierung bei gleichzeitiger Maximierung der Wirkung des Tidesteuerungsbetriebes auf die Gezeitenasymmetrie verfolgt. Zudem wurde in Abstimmung mit Analysen zur Bauwerksstabilität infolge Kolkbildung über die Variation der für die temporäre Querschnittsreduzierung heranzuziehenden Verschlüsse des Emssperrwerks die hier untersuchte Variante im Rahmen eines Optimierungsprozesses gefunden.

Die dargestellten Ergebnisse sind eine gutachterliche Grundlage für die Machbarkeitsstudie, die der Masterplan Ems für die Lösungsansätze Tidesteuerung und Sohlschwelle (untersucht durch die WSV) für das Ende des Jahres 2016 fordert. Sie bilden gleichzeitig eine Grundlage für die weitergehenden vertieften Untersuchungen für einen möglichen Betriebsplan für das Sperrwerk unter Einschluss/Optimierung der als günstig identifizierten Lösungsvarianten.

Im Zusammenhang mit dem in der Unterems weiträumig vorhandenen Flüssigschlick unterliegt die eingesetzte Modelltechnik Einschränkungen hinsichtlich ihrer quantitativen Aussagekraft zu den Einflüssen des Tidesteuerungsbetriebes.

Die Untersuchung fokussiert daher im Rahmen der Machbarkeitsstudie zunächst auf den grundsätzlichen qualitativen Nachweis der positiven Wirkung des Tidesteuerungsbetriebes sowie der Identifikation möglicher negativer Effekte bis hin zu solchen, die eine Umsetzung unmöglich machen könnten.



Die Auswirkungen des Tidesteuerungsbetriebes auf die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten reichen nach seewärts bis zum Ende des Emders Fahrwassers bzw. der Knock (das Tidevolumen wird aufgrund der rückschreitenden Wirkung des Aufstaus am Emssperrwerk bis Borkum leicht reduziert).

Nach landeinwärts wirkt sich die Tidesteuerung auf die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten bis zur Tidegrenze in Papenburg aus, wobei die Wirkung ab Papenburg vernachlässigbar ist.

Bezogen auf die Änderung der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten kann insgesamt festgestellt werden, dass deren absolute Werte sich - entsprechend des Ansatzes einer möglichst begrenzten Reduzierung des Tidevolumens - nur minimal verändern und tendenziell reduzieren, wohingegen der zeitliche Verlauf der Größen deutlich vergleichmäßigt wird. Die Gezeitenasymmetrie wird wesentlich reduziert.

Entsprechend des Ansatzes einer möglichst begrenzten Reduzierung des Tidevolumens bleiben auch die Salzgehalte unverändert mit der Tendenz zu einer minimalen Reduzierung.

Die Berechnung der Sedimenttransporte unterliegt einer erheblich größeren Unschärfe aufgrund der komplexen Flüssigschlickdynamik der Unterems. Eine Quantifizierung der Transporte ist daher erst nach einer derzeit beim NLWKN in der Entwicklung befindlichen Erweiterung der Modelltechnik zu erwarten, jedoch zeigen beide in diesem Gutachten verwendeten Modellansätze, einer für die morphodynamische Entwicklung, der andere fokussiert auf die Flüssigschlickdynamik, eine deutliche Verbesserung der Situation im Sinne der Ziele des Masterplan Ems auf.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die hydrodynamische und Schwebstoffsituation durch die Tidesteuerung mit Hilfe des Emssperrwerks durchgehend positiv beeinflusst wird. Es wurden keine Erkenntnisse gewonnen, die auf ein Ausschlusskriterium der Ansatzes Tidesteuerung hinausliefern.

Im Ausblick ist festzustellen, dass mit der derzeit in der Entwicklung befindlichen und hier parallel zur bestehenden Modelltechnik erstmals eingesetzten Modellerweiterung des NLWKN zur Berücksichtigung des Flüssigschlicks nach ihrer Fertigstellung ein Werkzeug zur belastbaren, auch quantitativen Prognose und Ausführungsplanung/Optimierung des Tidesteuerungsbetriebes und weiterer Maßnahmen des Masterplan Ems zur Verfügung stehen wird.

## 8. 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, unveröffentlicht
- BAGNOLD, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics. US government Print Office
- DELTAES (2014): Delft3D-Flow; Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual Hydro-Morphodynamics, Version 3.15, 12/2014
- FTZ WESTKÜSTE (2014a): Hydromorphologische Untersuchungen von Lösungsansätzen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes der Unterems, Büsum / Kiel
- FTZ WESTKÜSTE (2014b): Morphodynamische Modellierung zur Einschätzung der Erfolgsaussichten einer Steuerung des Ems-Sperrwerks zur Reduzierung von Schwebstoffgehalt und Bagervolumen, Büsum / Kiel
- HAN, Z., XU, Y., LIN, B. & XUAN, W.: Variation of tides and river regime after river training in the Qiantang estuary, Proc. Int. Conf. on Estuaries and Coasts, Hangzhou, China, 2003
- HERRLING, G. & NIEMEYER, H. (2007): Long-term spatial development of Habitats in the Ems-Dollard Estuary, HARBASINS project report, [www.nlwkn.niedersachsen.de](http://www.nlwkn.niedersachsen.de)
- HERRLING, G. & NIEMEYER, H. (2008): Comparison of the hydrodynamic regime of 1937 and 2005 in the Ems-Dollard estuary by applying mathematical modeling, HARBASINS project report, [www.nlwkn.niedersachsen.de](http://www.nlwkn.niedersachsen.de)
- LE HIR, P., ET AL. (2007): Erodability of natural sediments: experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests. Sediment and Ecohydraulics, IntercoH 2005, Saga, Japan. Proceedings in Marine Science, Vol. 9. Kusuda, T., Yamanishi, H., Spearman, J. and Gailani, J.Z. (Editors)
- MCLAREN, P., STEYAET, F. & POWYS, R. (1998): Sediment transport studies in the tidal basins of the Dutch Waddenzee. *Senckenbergiana marit.*, 29 (1/6): 53 – 61, Frankfurt a. M.
- MEYER, C. & G. RAGUTZKI (1999): KFKI Forschungsvorhaben Sedimentverteilung als Indikator für morphodynamische Prozesse, Dienstber. 21/1999, NLWKN - Forschungsstelle Küste
- O'BRIEN, M.P., (1931): Estuary and Tidal Prisms Related to Entrance Areas. *Civil Eng.* 1 (8): 738-739
- OBERRECHT, D. & WURPTS, A. (2014): Impact of Controlled Tidal Barrier Operation on Tidal Dynamics in the Ems Estuary, *Die Küste*, 81 (2014), 427-433
- ROELVINK, J.A. (2006): Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering* 53: 277-287.
- SHAMPA, I. & PRAMANIK, I.M.: Tidal River Management (TRM) for Selected Coastal Area of Bangladesh to Mitigate Drainage Congestion, *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 1, ISSUE 5, JUNE 2012, ISSN 2277-8616* 1
- VAN KESSEL, T., ET AL. (2012): Bed module for sand-mud mixtures, Delft3d-Report, Deltares, Delft
- VAN LEDDEN, M. (2001): Modelling of sand-mud mixtures – Part II: A process-based sand-mud model, Report Z2840, Delft Hydraulics
- VAN LEDDEN, M. (2003): Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins, Dissertation, TU Delft

- VAN RIJN, L. (1987): Mathematical Modelling of Morphological Processes in the case of Suspended Sediment Transport, Dissertation, TU Delft
- VAN RIJN, L. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands
- VAN RIJN, L. (2004): Description of TRANSPOR2004 and Implementation in Delft3D-ONLINE, Interim Report Z3748, Delft Hydraulics
- WINTER, C.: Zur morphodynamischen Modellierung am Beispiel der Tideeider, Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2001
- WINTER, C., V. BACKER, W. ADOLPH, A. BARTHOLOMÄ, M. BECKER, D. BEHR, C. CALLIES, R. CAPPERUCCI, M. EHLERS, H. FARKE, C. GEIMECKE, S. GRAYEK, C. HASS, C. HEIPKE, G. HERRLING, H. HILLEBRAND, D. HODAPP, P. HOLLER, R. JUNG, H. KRASEMANN, I. KRÖNCKE, E. KWOLL, J. MÄRZ, D. MEYERDIERKS, F. MIELCK, G. MILLAT, H.C. REIMERS, R. REUTER, A. SCHMIDT, J. STANEVA, E. STANEV, J. VAN BEUSEKOM, K. WIRTZ (2016): WIMO – Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht – Abschlussbericht, 158 S. DOI 10.2314/GBV:860303926
- ZANKE, U. (2016): Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Sohlensicherung und Kolkbildung am Emssperrwerk bei Betriebsfällen zur Tidebeeinflussung; Zanke und Partner, Garbsen Januar 2016

## 9. Abkürzungen und Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
<b>BSÖ/HSÖ</b>	= Binnen- und Hauptschifffahrtsöffnung	
<b>DGM</b>	= Digitales Geländemodell	
<b>PSU</b>	= Practical Salinity Units	[ - ]
<b>Thb</b>	= Tidehub	
<b>Thw</b>	= Tidehochwasser	[NHN + m]
<b>NÖ</b>	= Nebenöffnung	
<b>Tnw</b>	= Tideniedrigwasser	[NHN + m]
<b>TSB</b>	= Tidesteuerungsbetrieb	

## 10. Anlage

### Anlage 01 – Beeinflussung der kurzfristigen residuellen Schwebstofftransporte durch variierende Oberwasserabflussmengen

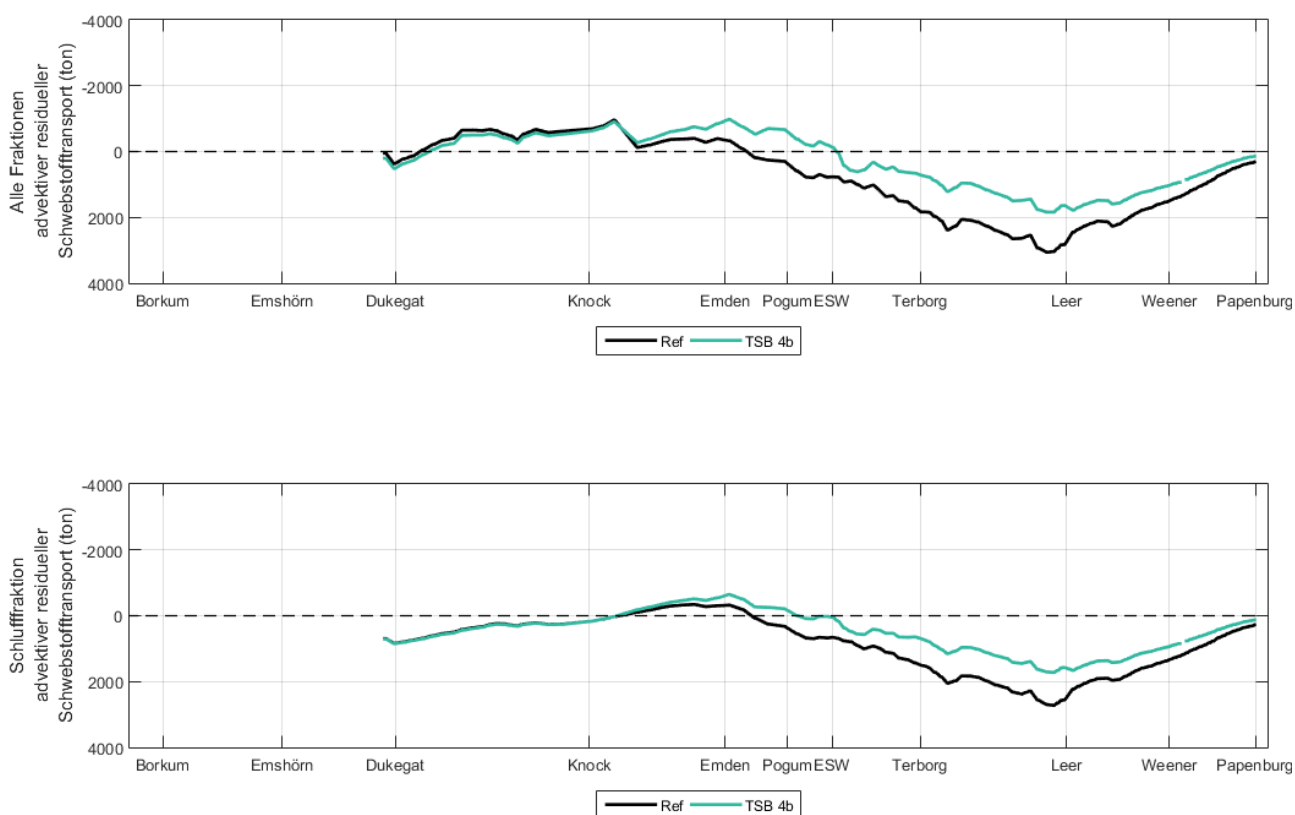
Nachfolgend wird die in Abschnitt 6 dargestellte Auswertung der residuellen Schwebstofftransporte für weitere Oberwasserabflüsse vorgestellt. Die Darstellungen erfolgen analog jeweils für den Vergleich Referenzzustand und den untersuchten Tidesteuerungsfall.

Dargestellt werden weiterhin die residuellen Schwebstofftransporte einmal für die Schlufffraktion allein und einmal für sämtliche als Schwebstoff transportierten Sedimente. Der Gesamtschwebstofftransport variiert gegenüber dem der Schlufffraktion, da die hinzugenommenen Sedimente einen unterschiedlichen Bewegungsbeginn und unterschiedliches Bewegungsverhalten aufweisen.

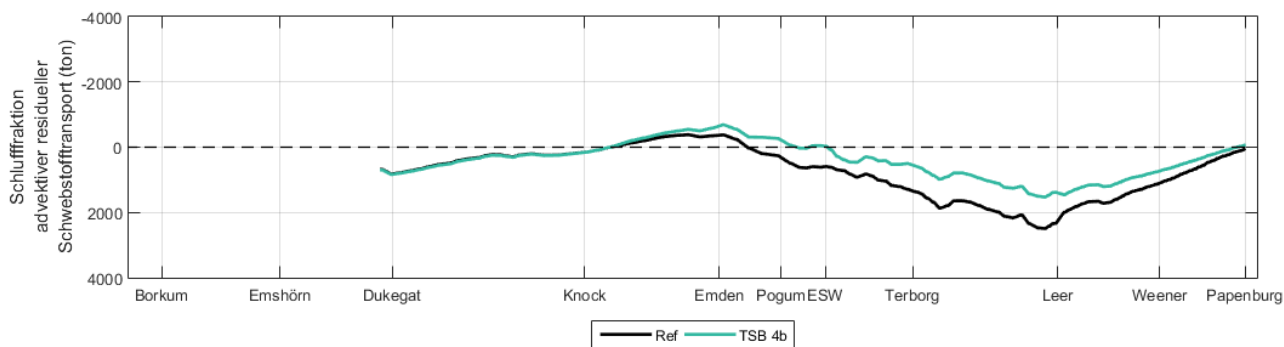
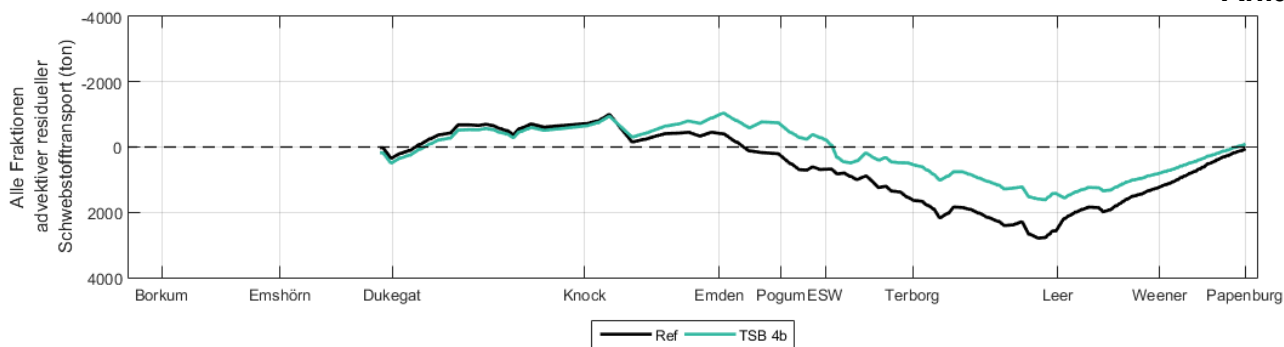
Man beachte, dass diese analog zu Abbildung 27 aufgrund des zeitlichen Umfangs von nur zwei Spring-Nipp-Tidezyklen nur die kurzfristige Reaktion des Systems abschätzen.

Die Ergebnisse bestätigen die grundsätzliche Erkenntnis, dass höhere Oberwassermengen den seewärtigen Transport stärken bzw. den landeinwärts gerichteten Transport schwächen.

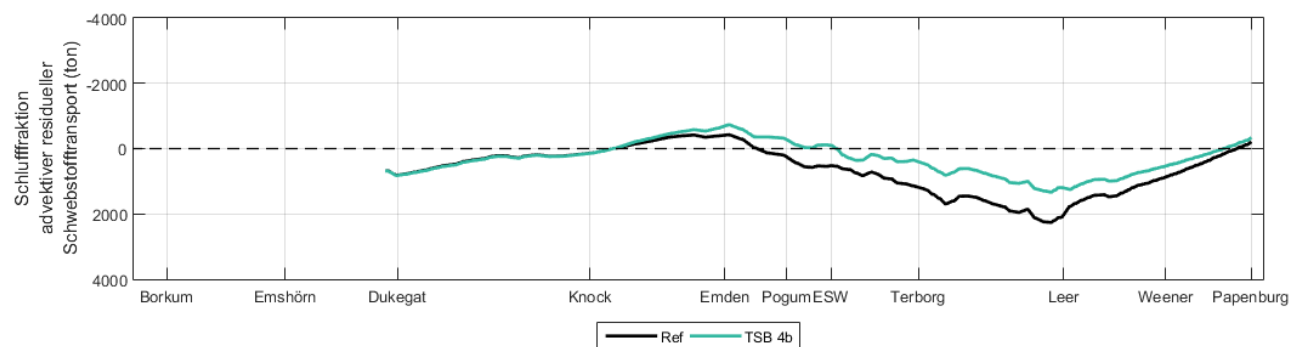
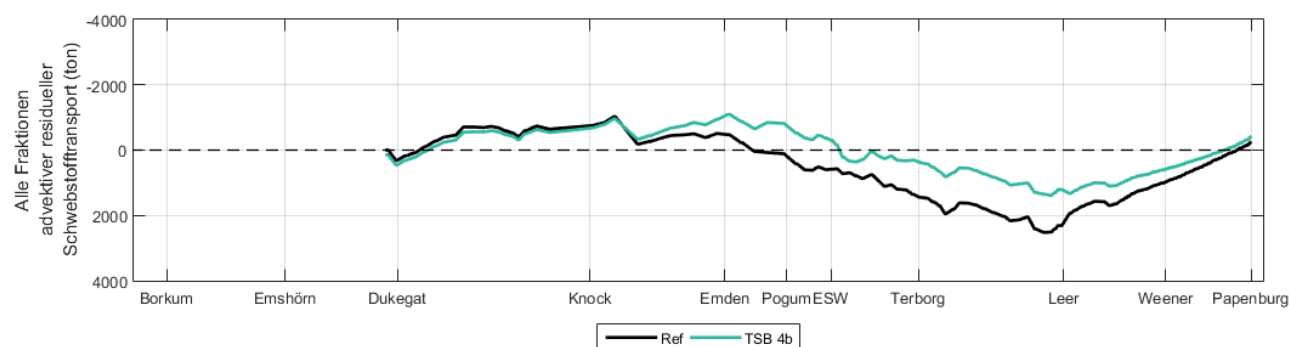
Die positive Wirkung des Tidesteuerungsbetriebes ist unabhängig von der Oberwassermenge gegeben.



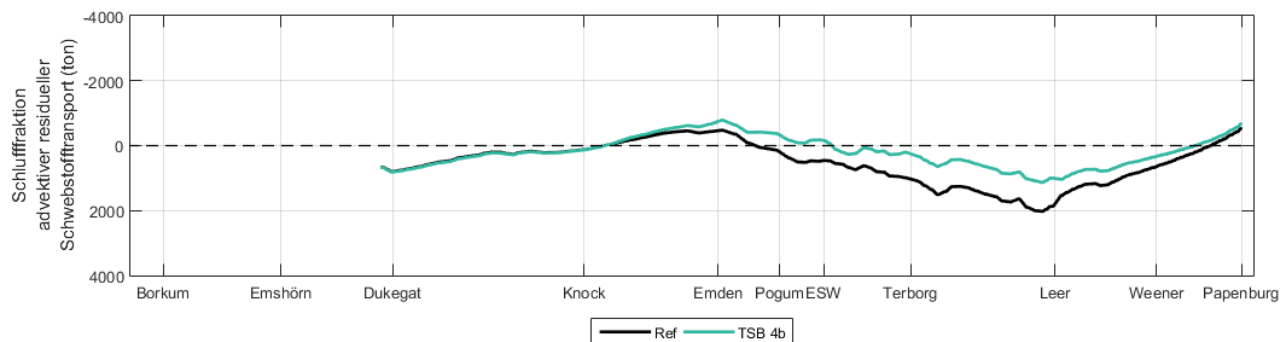
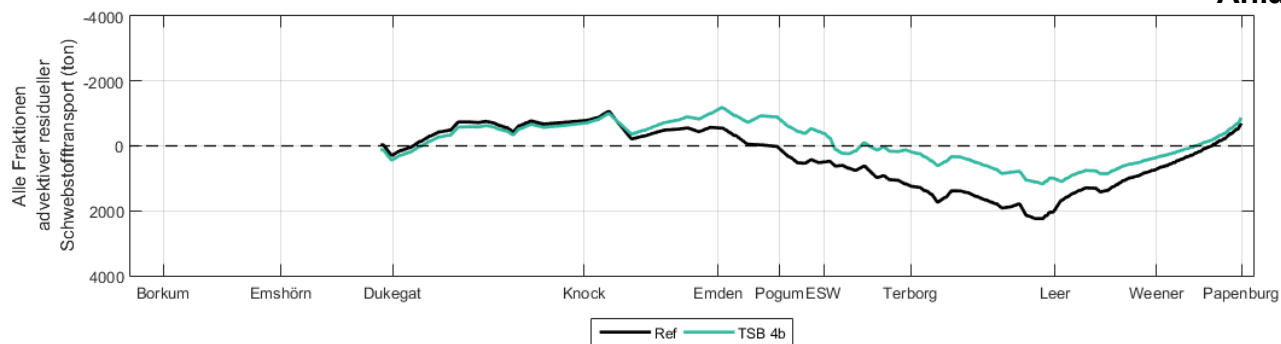
**Abbildung 30:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransportes nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 25 m<sup>3</sup>/s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.



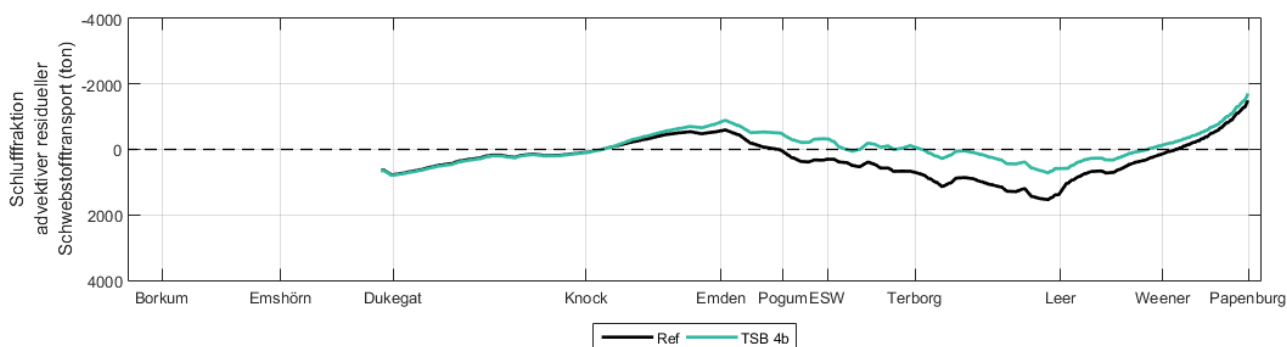
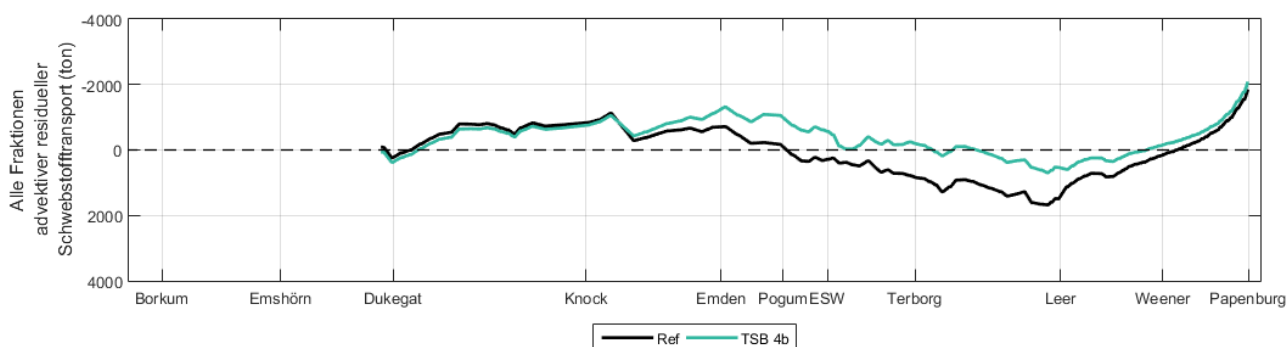
**Abbildung 31:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 50 m<sup>3</sup>/s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.



**Abbildung 32:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 75 m<sup>3</sup>/s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.



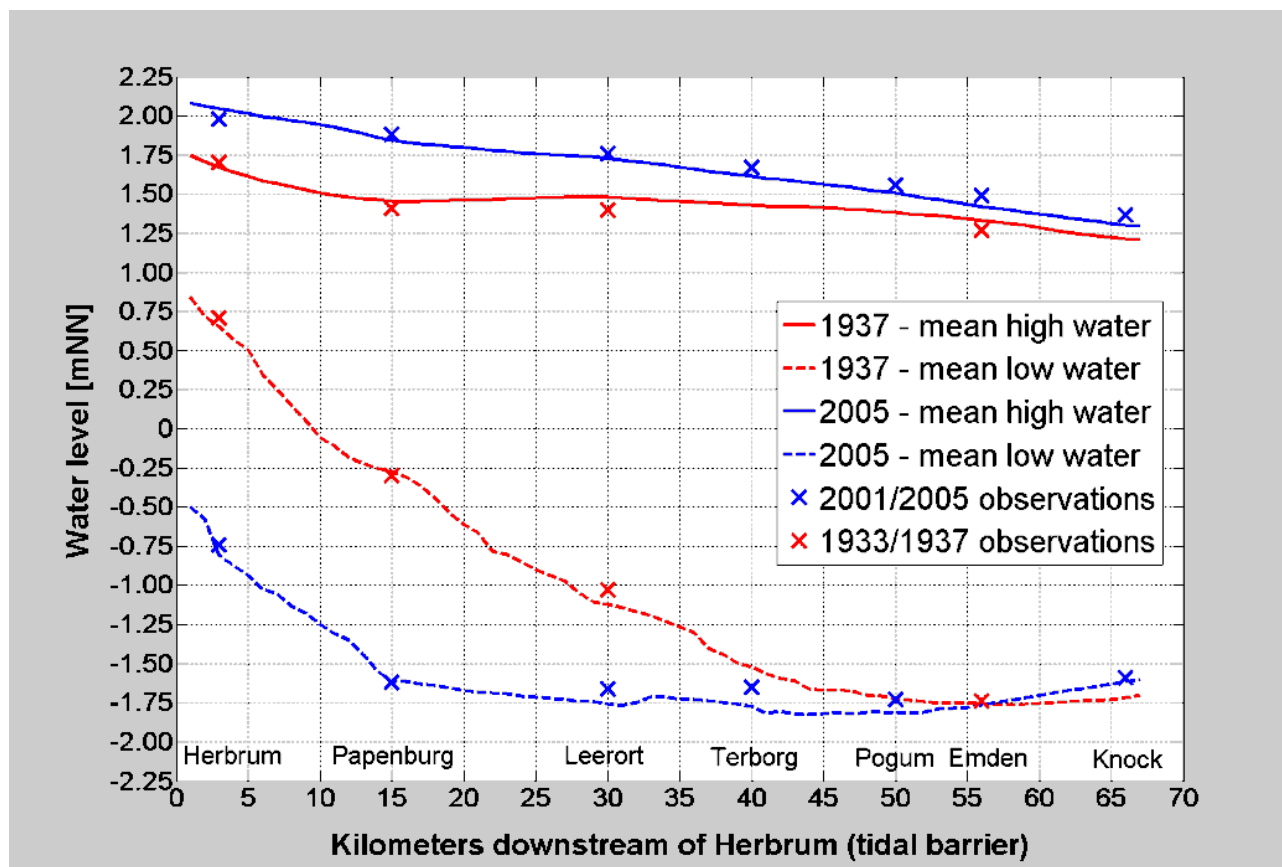
**Abbildung 33:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 100 m<sup>3</sup>/s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.



**Abbildung 34:** Darstellung des residuellen Schwebstofftransports nach 14 Tagen Analysezeitraum bei einem konstanten Oberwasser von 150 m<sup>3</sup>/s. Negative Werte zeigen Stromauftransport an.

## Anlage 02 – Veränderung der Tideparameter durch die Ausbauten zwischen 1937 und 2005

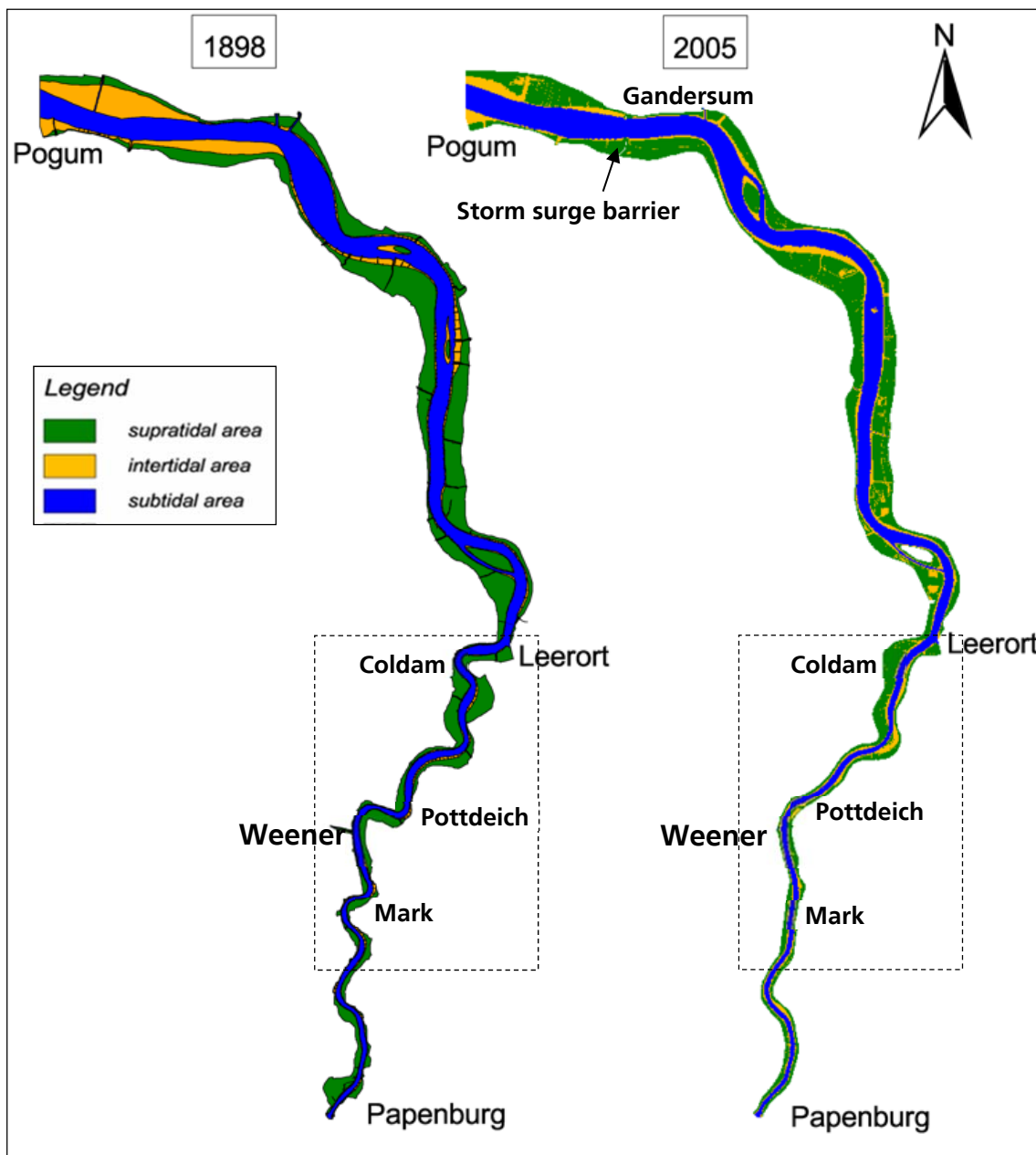
Die nachfolgenden Darstellungen sind dem Untersuchungsbericht Herrling & Niemeyer (2008) entnommen. Sie verdeutlichen die historische Entwicklung des Emsästuars anhand dessen Hydrodynamik. Hierzu wurden historische Topographien rekonstruiert und anschließender mit Hilfe numerischer Modellierung die Gezeitendynamik im System von 1937 sowie dem von 2005 berechnet und verglichen.



**Abbildung 35:** Historische Entwicklung der Tidehoch- (durchgehende Linien) und Niedrigwasser (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau). Die Kreuze zeigen die an den Pegelmessstellen erfassten Messwerte.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass einhergehend mit den Vertiefungen und Begradigungen der Ems (Abbildung 36) die Gezeitendynamik erhebliche Veränderungen aufweist, die durch massiv erhöhtes Tidevolumen und entsprechend gesteigerte Gezeitenasymmetrie charakterisiert werden können.



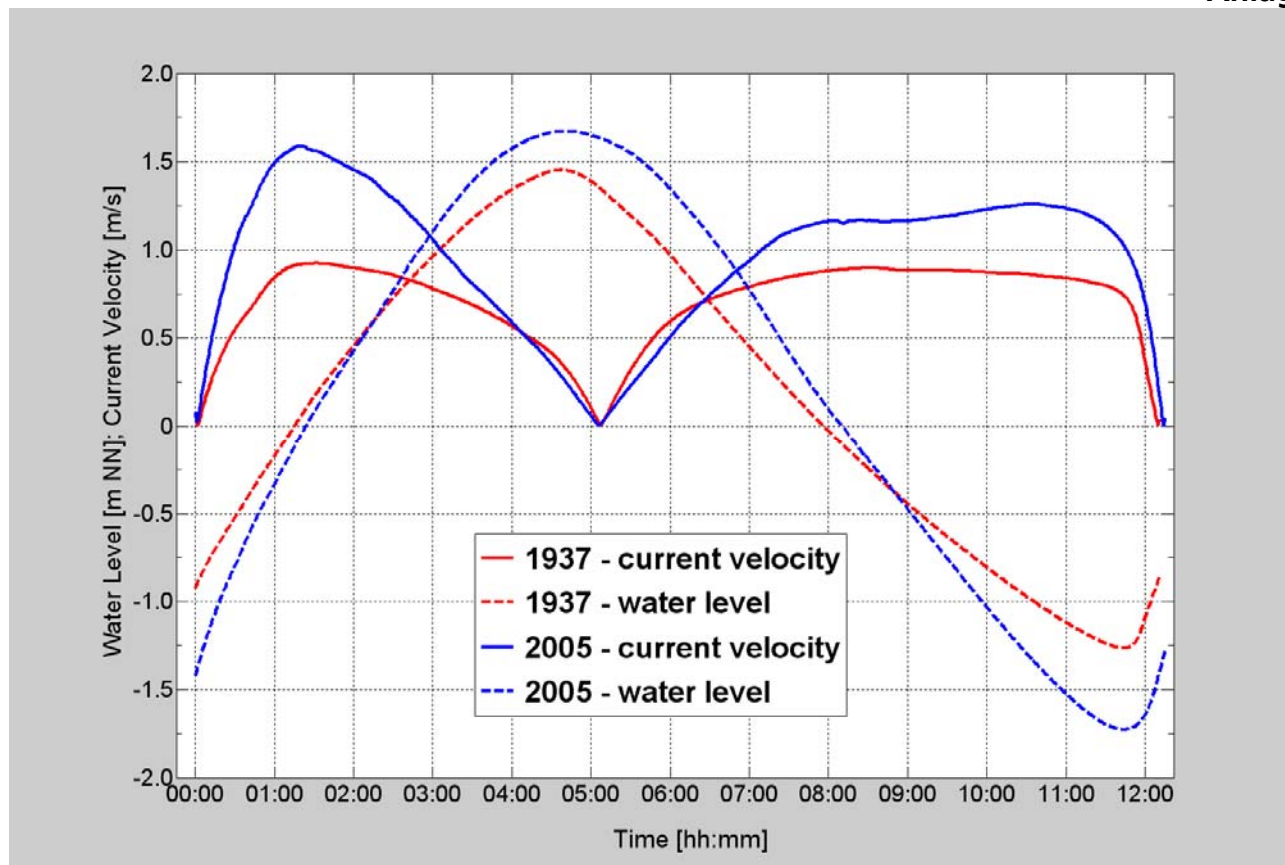


**Abbildung 36:** Unterems entsprechend historischer Rekonstruktion für den Zustand 1898 im Vergleich mit dem von 2005 (Herrling & Niemeyer 2008)

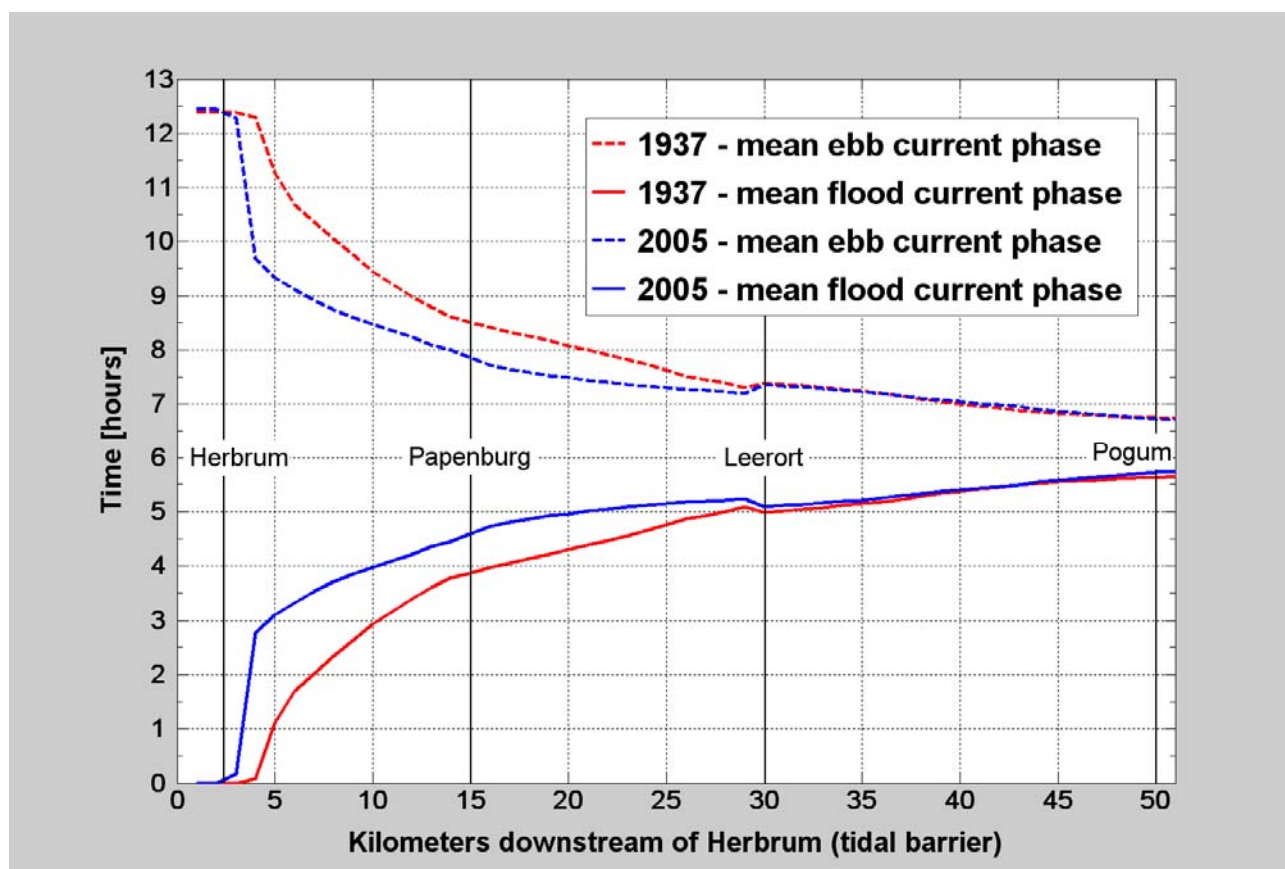
Insbesondere stromaufwärts von Leerort ist es zu einer zunehmenden Verkürzung der Flutphase gekommen bei entsprechender Verlängerung der Ebbphase. Bei Papenburg beträgt die Verkürzung der Flutphase etwa eine Stunde, in Richtung Herbrum nimmt diese überproportional zu, bis etwa zwei Kilometer vor Herbrum, wo aufgrund des sehr geringen Tidevolumens die Oberwassermenge das Abflussgeschehen komplett bestimmt, so dass dort keine Flutphase mehr ermittelt werden kann.

Abbildung 38 zeigt im Ergebnis eine erheblich gesteigerte Tideasymmetrie, wie sie auch in Abbildung 4 für einen aktuellen Zeitraum dokumentiert ist.

Korrespondierend mit dem vergrößerten Tidevolumen lässt sich auch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten in der gesamten Unterems belegen. Abbildung 37 zeigt dies exemplarisch für einen Querschnitt bei km 35.

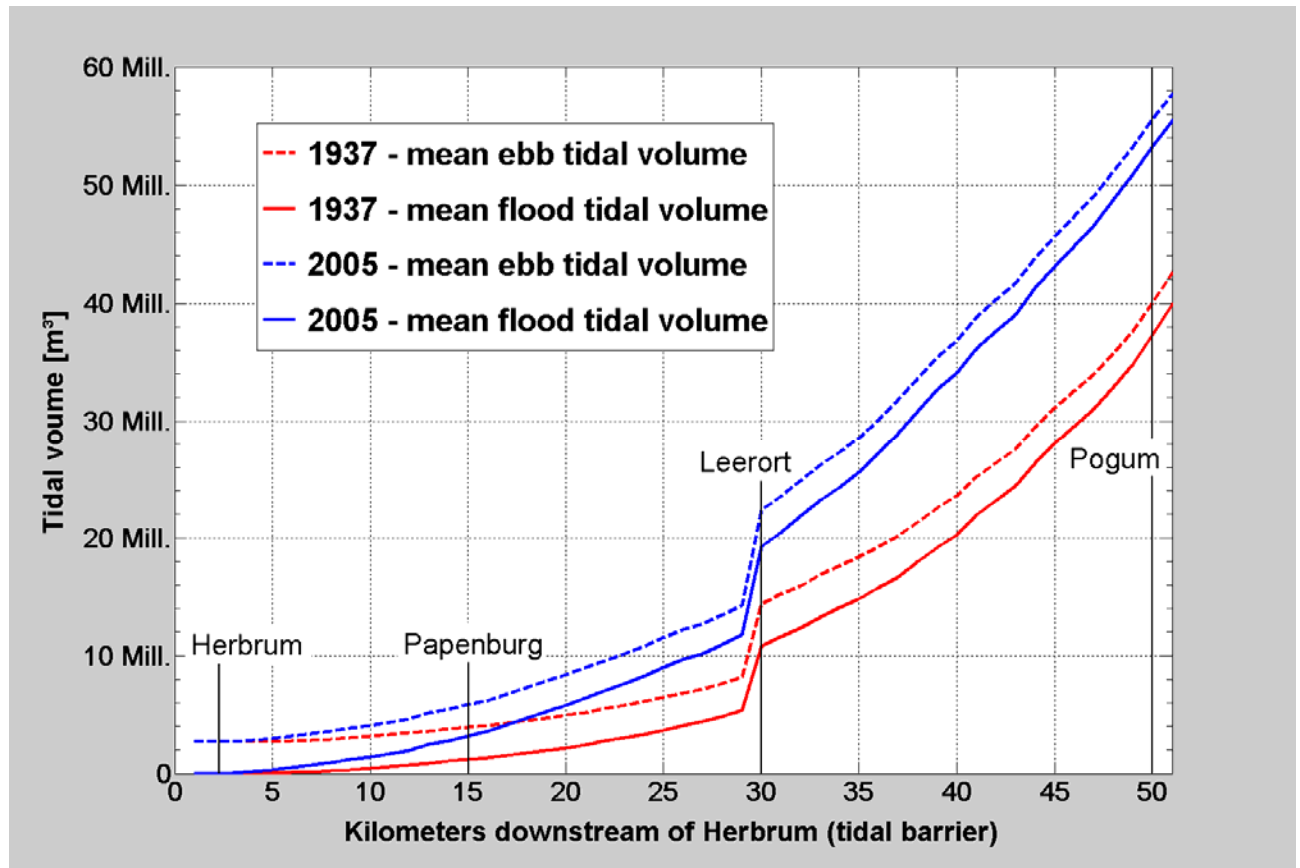


**Abbildung 37:** Exemplarische Darstellung zur Veränderungen der Tidekurve und der Strömungsgeschwindigkeiten für die Ems bei km 35 (Jemgum) zwischen 1937 und 2005 (Herrling & Niemeyer 2008)



**Abbildung 38:** Historische Entwicklung der Flut- (durchgehende Linien) und Ebbdauern (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau).

Die Tideasymmetrie nimmt in Richtung Papenburg stetig weiter zu.



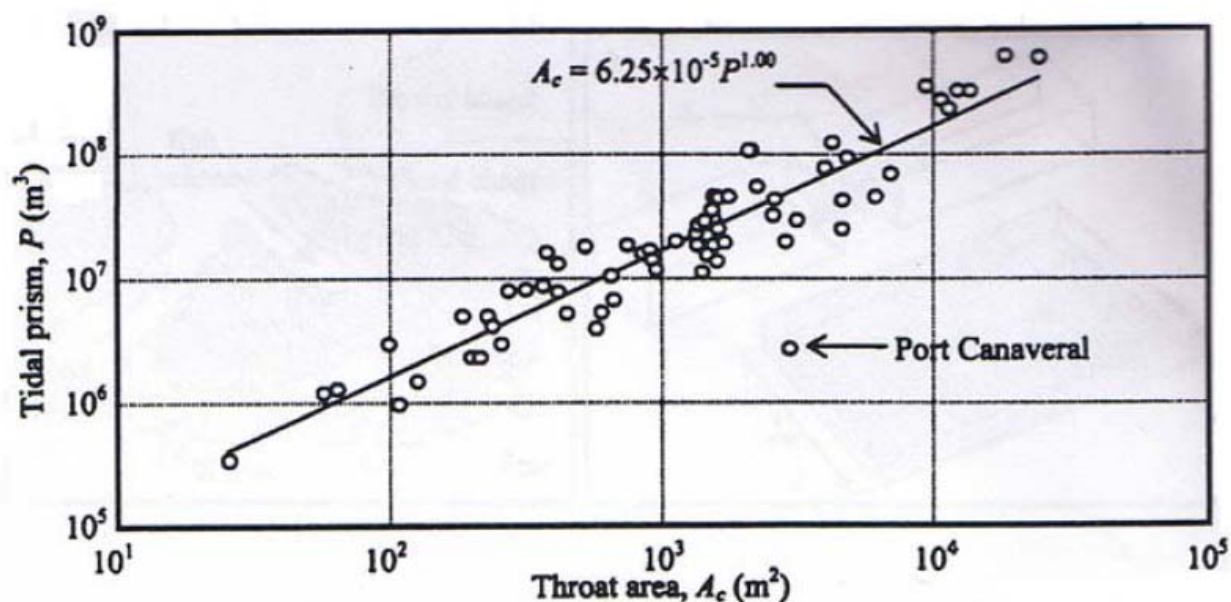
**Abbildung 39:** Historische Entwicklung der Flut- (durchgehende Linien) und Ebbitidevolumina (gepunktete Linien) im Längsverlauf der Ems für den Zustand 1937 (rot) und 2005 (blau).

### Anlage 03 – Empirische Einschätzung der langfristigen morphologischen Entwicklung der Fließquerschnitte

Empirische Untersuchungen seit den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts belegen den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen den Querschnittsflächen durchströmter Rinnen und den an diese angeschlossenen Tidevolumina, die mit dem Gezeitenrhythmus hindurchströmen.

Diese wurden zunächst für Tidebecken und Wattenzugsgebiete (O'Brien 1939, Abbildung 40) dokumentiert, wo die zusätzliche Überlagerung mit der aus dem Hinterland entwässern Frischwassermenge und dementsprechend der Mechanismus der großräumigen Ästuarzirkulation nicht gegeben sind.

Es liegen zahlreiche empirische Nachweise hierzu vor, die sich allerdings aufgrund der Überlagerung der Einschnürungseffekte mit der natürlichen Dynamik des Systems nur in einem statistischen Sinne quantifizieren lassen.



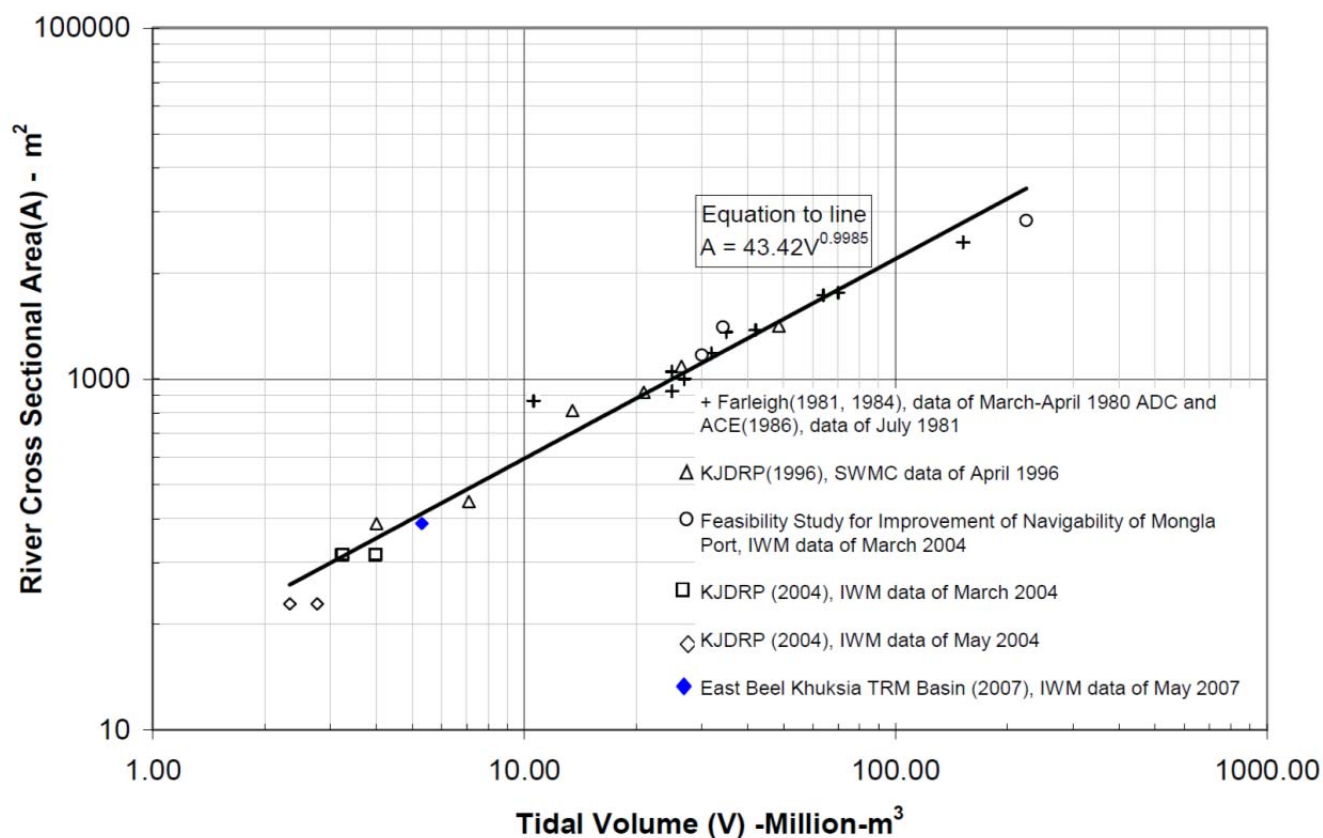
**Abbildung 40:** Verhältnis von Abflussquerschnitten und angeschlossenen Tidevolumina für verschiedene Tidebecken an der Ostküste der Vereinigten Staaten von Amerika nach O'Brien (1939)

Abbildung 40 verdeutlicht, dass ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen den durchströmten Querschnitten und den angeschlossenen Tidevolumina existiert. Jedoch zeigt die erhebliche Streuung der Werte, dass weitere Einflüsse das konkrete zahlenmäßige Verhältnis beeinflussen. Solche Einflüsse können menschlichen Ursprungs sein wie Landgewinnung, Eindeichungen, Vertiefungen von Zufahrtswegen oder auch momentane Abweichungen vom dynamischen Gleichgewicht, beispielsweise als Folge von Extremereignisse usw. . Ebenso ist die geringe Genauigkeit und räumliche Auflösung der damaligen topografischen Erfassung als Ursache einer erhöhten Streuung zu erwähnen.

Der Leser sei auf den „Ausreißer“ Port Canaveral hingewiesen, der durch eine damalige nassbagertechnische Vertiefung der dortigen Zufahrtsrinne begründet ist.

In Ästuaren ist der Wirkmechanismus durch die stärker ausgeprägte Asymmetrie der Gezeit und durch die Frischwassereinmischung und die in ihrer Folge auftretende großräumige Ästuarzirkulation etwas komplexer, weist aber grundsätzlich ähnliche Charakteristik auf.

Wird die Untersuchung unter Verwendung heutiger Messtechnik und -methodik auf ein einzelnes Ästuar begrenzt, wie in Abbildung 41 für einen stark Schwebstoff führenden und wenig regulierten Flachlandfluss im Ganges-Mündungsdelta in Bangladesch (Shampa & Pramanik, 2012), zeigt sich eine deutlich geringere Streubreite für das entsprechend der O'Brien-Relation ausgewertete Verhältnis von Abflussquerschnitt und Tidevolumen entlang des Flusses.



**Abbildung 41:** Verhältnis von Tidevolumina und Abflussquerschnitten des Kobadak-Flusses im Ganges, Brahmaputra und Meghna Mündungsdelta in Bangladesch nach Shampa & Pramanik (2012).

Das Schrifttum kennt eine Vielzahl weiterer empirischer Zusammenhänge, welche die vorgenannten Zusammenhänge weiter konkretisieren. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sei hier lediglich ein weiterer genannt, der eine gewisse Relevanz für die vorliegende Fragestellung hat.

Abbildung 42 zeigt Querschnitts-Abfluss-Relationen für eine Vielzahl weltweit verteilter Ästuare mit Schwerpunkt auf den chinesischen Flüssen. Aufgetragen ist ein mittlerer Abfluss, der über die jeweils zugrundeliegende Tidedauer in ein Tidevolumen umgerechnet werden kann und entsprechend vergleichbar aussagekräftig ist.

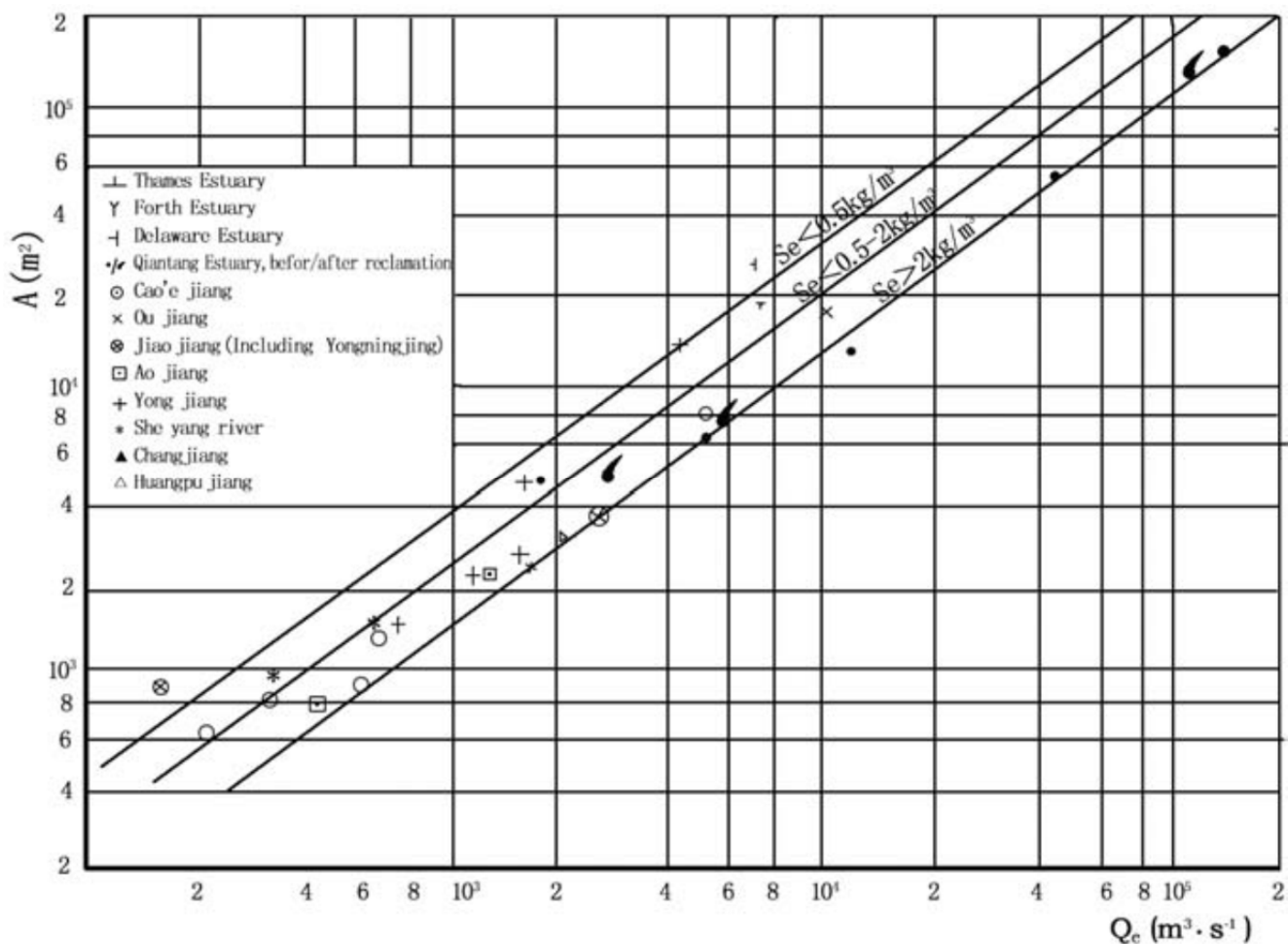
Han et al. (2003) zeigen die Auswirkungen der Einschnürung des Qiantang Ästuars (Hangzhou-Bucht), die sich in einer Reduzierung der Tidevolumina innerhalb weniger Jahre äußern.

Eine vergleichbare Situation wurde durch die Eiderabdämmung hervorgerufen. Hier wurde durch Abdämmung in Verbindung mit einer erheblichen Querschnittsverringern sowie zusätzlicher



Vordeichung des Katinger Watts (oberhalb der Abdämmung) das Tidevolumen deutlich reduziert. Als Folge davon fand erheblicher Sedimenteintrag statt, der zu einer Reduzierung der Querschnitte in der Tideeider führte. Diese Anpassung dauerte etwa eine Dekade, wurde jedoch durch zwischenzeitliche Variationen im Steuerungsbetrieb des Sperrwerks überlagert.

Das Emssperrwerk wurde aus den vorgenannten Gründen so konzipiert, dass von ihm keine lokale Reduzierung des Fließquerschnittes ausgeht.



**Abbildung 42:** Empirische Zusammenstellung des Verhältnisses der Durchflussquerschnitte bei Tidemittelwasser und dem Ebbstromdurchfluss für verschiedene Ästuare aus Han et al. (2003). Die Regressionslinien ordnen die Punktwolke nach der mittleren Sedimentkonzentration. Die Darstellung beinhaltet das Qiantang Ästuar vor (gefüllte Punkte) und nach (gefüllte Punkte mit Schweif) einer Begrädnung und Ausbau.

Die vorstehenden Ausführungen wie auch die vielfältigen Erkenntnisse aus den Beweissicherungsuntersuchungen der norddeutschen Tideästuare zeigen, dass flussbauliche Eingriffe dort einen morphologischen Nachlauf zur Folge haben, über den sich das Gewässer in seiner Gesamtheit (Hydrodynamik und Tiefenverteilung) an den Eingriff anpasst. Der morphologische Nachlauf kann für Bewirtschaftungsfragen relevante Größenordnungen annehmen und muss letztlich im Zusammenspiel mit der zeitgleichen Anpassung der Gezeitendynamik verstanden werden.

Verkürzt kann festgestellt werden, dass der Fließquerschnitt eines Ästuars mit dem zugeordneten Tidevolumen korrespondiert, d.h. Veränderungen des Tidevolumens gehen mit einer Anpassung der Fließquerschnitte einher und umgekehrt bewirkt die Reduzierung der Fließquerschnitte eine entsprechende Anpassung des Tidevolumens mit nachfolgend sich auch im weiteren Verlauf des an die Einschnürung angrenzenden Flussabschnitts anpassenden Querschnitten. Das vorgenannte Verhalten kann dem morphologischen Nachlauf zugerechnet werden. Dieser erstreckt sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Eingriff über einen Zeitraum von Jahren bis Jahrzehnten.

Da auch die Tidesteuerung eine (temporäre) Einschnürung des Fließquerschnitts verursacht, sollte ihre langfristigen Auswirkungen im Rahmen mittel- bis langfristiger (5-15 Jahre) hydromorphodynamischer Modellrechnungen konkretisiert werden. Solche sind aufgrund des unverhältnismäßigen Untersuchungsaufwands nicht Bestandteil der vorliegenden Studie.

Eine weitere Konsequenz für den Tidesteuerungsbetrieb besteht darin, durch diesen die Tidevolumina so wenig wie möglich zu reduzieren. Die Tidesteuerung an sich wirkt zwangsläufig reduzierend auf das Tidevolumen, da die Flut beim Einströmen in die Unterems zeitweise und gezielt gebremst wird. Die Intensität (Verbaugrad) und Dauer dieser Bremsung entscheidet letztlich über das Maß dieser Reduzierung. In jedem Fall jedoch resultiert aus dem durch Tidesteuerung reduzierten Tidevolumen eine ebenfalls geringere Räumkraft während der Ebbphase.

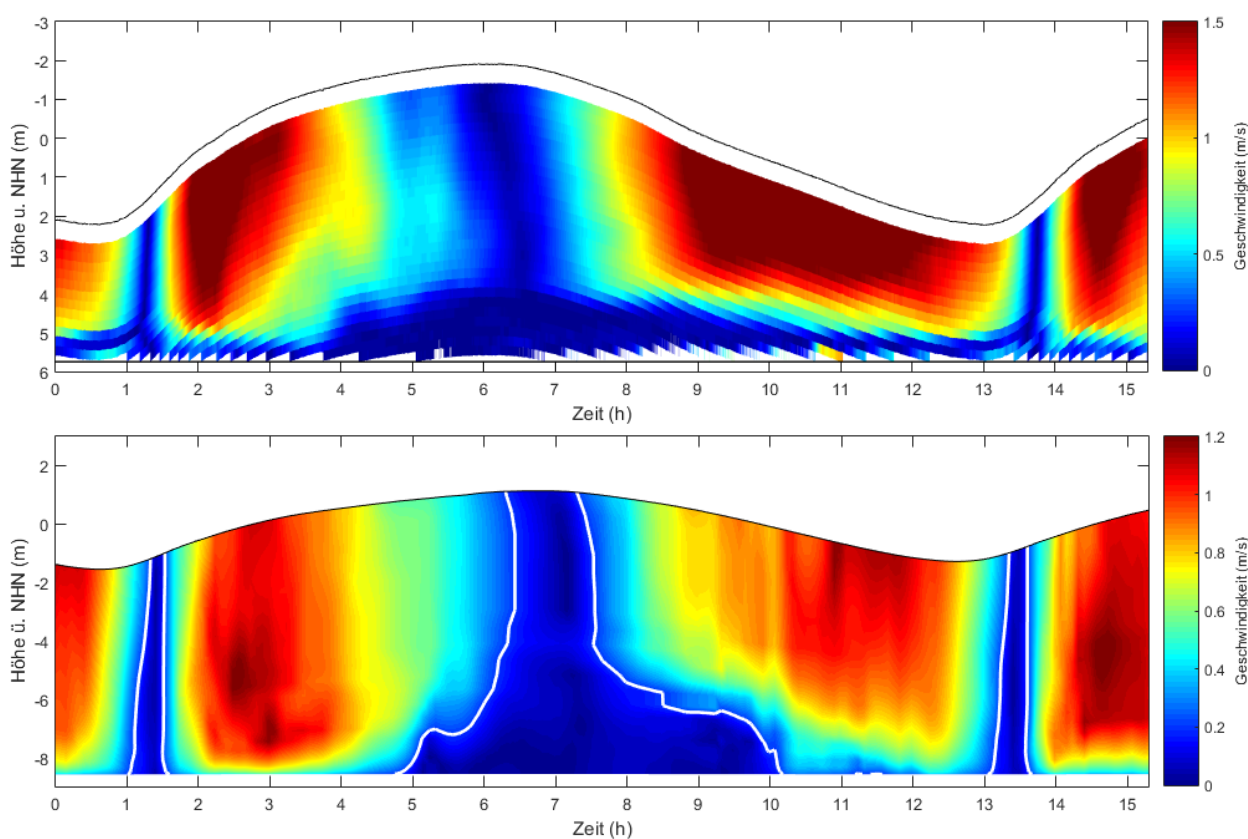
Anzustreben ist also eine möglichst starke Reduzierung der Gezeitenasymmetrie bei möglichst vollständiger Beibehaltung der Räumkraft des Ebbstromvolumens.

## Anlage 04 –Beschreibung des Modellansatzes zur verbesserten Berücksichtigung der Flüssigschlickdynamik

Abbildung 29 zeigt residuelle Sedimenttransporte, die auf einer erweiterten Modelltechnik basieren, welche eine deutlich realistischere Abbildung der Flüssigschlickdynamik ermöglicht.

Diese ist noch in der Entwicklung hin zu einer vollständig morphodynamischen Berechnung, erlaubt aber bereits die Berechnung der Flüssigschlicktransporte innerhalb einer ansonsten festen Topographie, d.h. ohne Übergang des Feinsediments in die Feste Sohle oder Erosion aus dieser heraus.

Da eine Dokumentation des Modellansatzes bislang nicht vorliegt, wird nachfolgend neben einer kurzen Beschreibung der vorgenommenen Erweiterung ein qualitativer Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messungen aus der Ems bei km 35 vorgestellt.



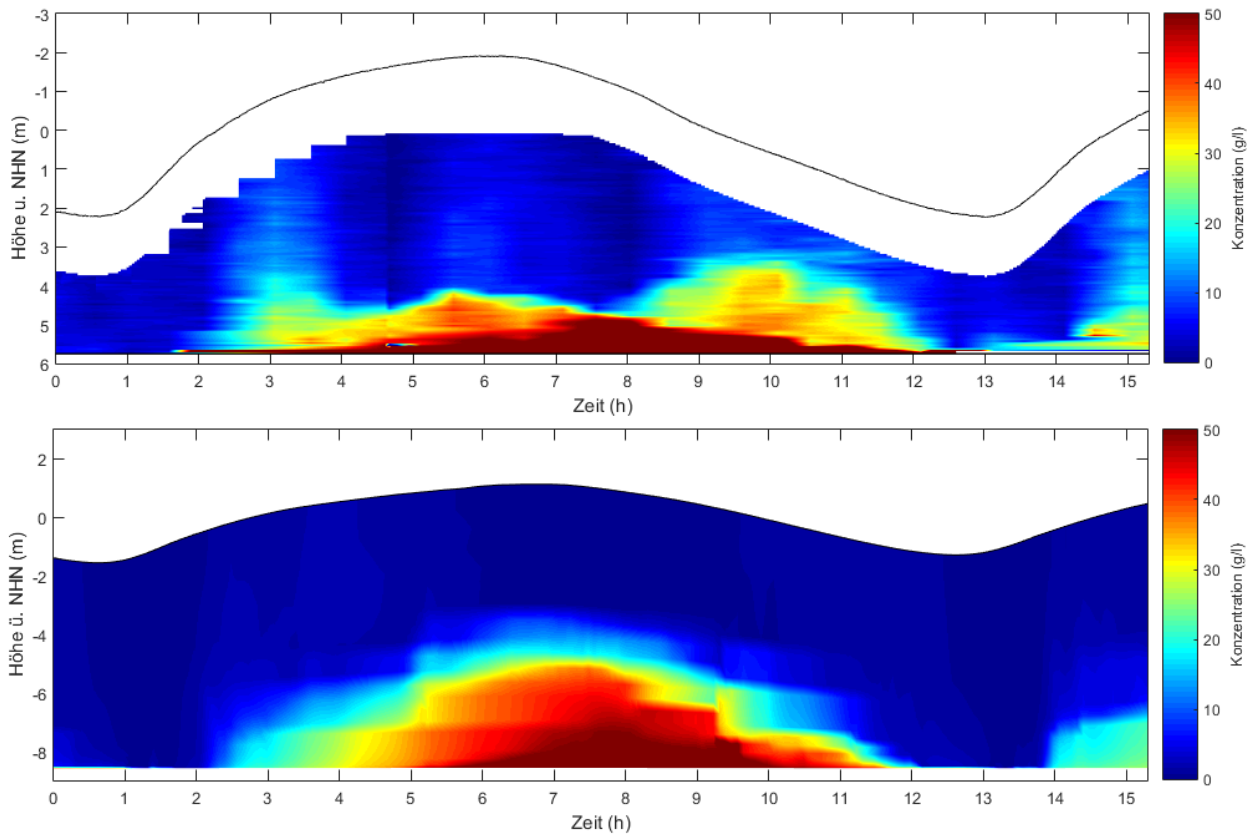
**Abbildung 43:** Darstellung der gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeit. Oben gemessen (Winter et al. 2016 & FSK), unten modelliert

Der Modellansatz besteht aus einer Anpassung der Turbulenzschließung und einem rheologischen Modell zur Berechnung einer kinematischen Viskosität unter Berücksichtigung thixotropen, scherverflüssigenden Verhaltens und einer Fließgrenze des Flüssigschlicks.

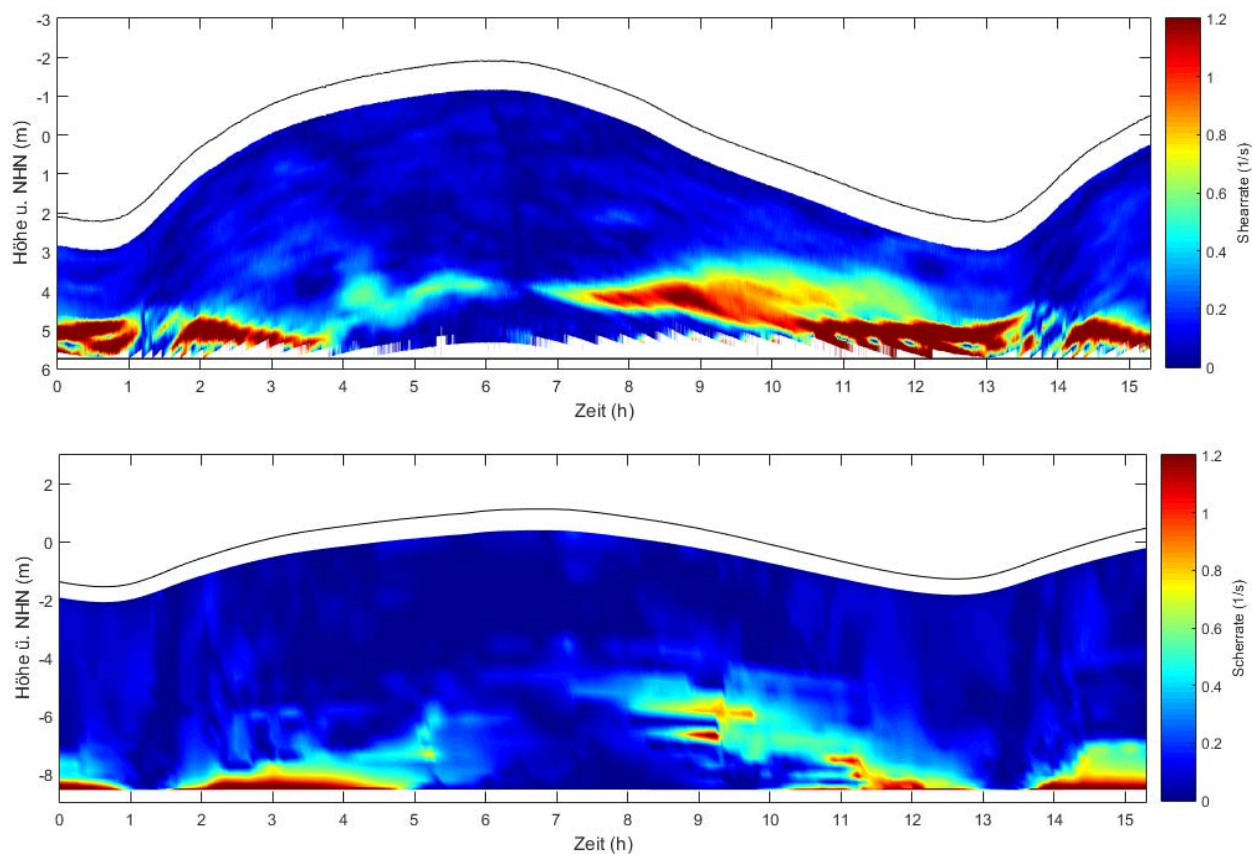
Die turbulente Scheinviskosität wird im Bereich niedriger Reynoldszahlen gedämpft bis hin zur völligen Abschaltung. Zeitgleich wird eine kinematische Viskosität basierend auf einem rheologischen Ansatz berechnet, deren Wert neben der lokalen Suspensionskonzentration von der Belastungsvergangenheit der Suspension abhängt.



Der Übergang von schluffigem Feinsediment zu Flüssigschlick und umgekehrt erfolgt hierbei massenkonsistent auf Zeitschrittebene, so dass die Flüssigschlickmenge im System sich abhängig von der hydrodynamischen Belastung ebenfalls dynamisch einstellt.



**Abbildung 44:** Darstellung der gemessenen und modellierten Schwebstoffkonzentration. Oben gemessen (Winter et al. 2016 & FSK), unten modelliert



**Abbildung 45:** Darstellung der gemessenen und modellierten vertikalen Scherung der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten. Oben: gemessen (Winter et al. 2016 & FSK), unten: modelliert

Eine detailliertere Beschreibung des Modellansatzes wird mit dessen offizieller Einführung verfügbar. An dieser Stelle soll durch den Vergleich von Mess- und Modelldaten die grundsätzliche Eignung zur Reproduktion der Flüssigschlickdynamik belegt werden.

Abbildung 43 zeigt den Vergleich gemessener und berechneter Strömungsgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Punkten in einem Emsquerschnitt bei km 35 (Jemgum). Diese Position weist bei Oberwasserabflüssen unterhalb  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  eine Flüssigschlickschicht in Sohlhöhe auf, die nur in der ersten Hälfte der Flutphase und zum Ende der Ebbphase hin etwas weiter in die Strömung der oberen Schicht eingemischt wird. Letzteres wird durch die in Abbildung 44 dargestellte Schwebstoffverteilung so wie auch durch die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlhöhe (Abbildung 43) deutlich.

Abbildung 45 zeigt den Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeitsscherungen, die einen qualitativen Eindruck von der zeitlichen Entwicklung des Wechsels zwischen Einmischung und Absetzen von suspendiertem Sediment bzw. Flüssigschlick geben.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Modell einen Arbeitsstand verkörpert, der weiter verbessert wird, jedoch bereits in der heutigen Form eine deutlich bessere Abbildung der Schwebstoffdynamik insbesondere im Flüssigschlickbereich ermöglicht, als diese mit dem für das Gutachten verwendeten Modell nach dem Stand der Technik möglich ist. Die in Abbildung 34 dargestellten residuellen Schwebstofftransporte geben daher einen deutlich belastbareren Eindruck von der unmittelbaren Reaktion des Unteremssystems auf die Tidesteuerung.

