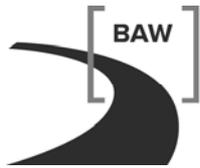


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Vertiefung der Außenems bis Emden

**Gutachten zu den
ausbaubedingten Änderungen von
Hydrodynamik, Transport und Seegang**

BAW-Nr. A3955 03 10144



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Vertiefung der Außenems bis Emden

Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang

Auftraggeber: WSA Emden
Am Eisenbahndock 3
26725 Emden

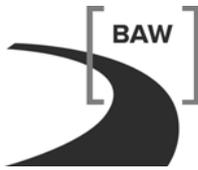
Auftrag vom: 7. Juli 2008, Az.: 2P-231.2/AuEm/9 SA4

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 10144

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) J. Jürges
Dr.-Ing. H. Weilbeer
Dipl.-Ing. (FH) I. Uliczka
Dr. rer. nat. N. Winkel

Hamburg, im September 2012

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



Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten beschreibt die ausbaubedingten Änderungen der Hydrodynamik, der Salzintrusion, des Schwebstoffgehalts und –transports, der Unterhaltungsbaggerung, der Wassertemperatur sowie des Seegangs durch die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden, der Verbreiterung der Fahrrinne bei Emden zur Wendestelle sowie der Querschnittseinengung bei Ems-km 47 durch die Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 .

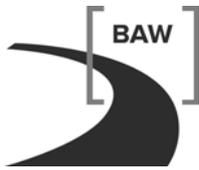
Grundlage der wasserbaulichen Systemanalyse zur detaillierten Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen ist die Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. § 5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) (WSD Nordwest, 2009).

Der Ausbauzustand AZ1 wird mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modells untersucht und die Änderungen in Bezug auf den planerischen Sollzustand PS2 dargestellt. Davon abweichend werden die Modellanwendungen, die das Sedimentmanagement im Ist-Zustand abbilden, mit dem Ems-Modell für den Ist-Zustand des Jahres 2010 durchgeführt. Die sonst verwendeten planerischen Sollzustände werden dazu nicht genutzt, damit die Simulationen zum Sedimentmanagement im Ist-Zustand so realistisch wie möglich durchgeführt werden. Die Projektbeschreibung des WSA Emden (WSA Emden, 2012a) enthält alle notwendigen Informationen zur geplanten Maßnahme:

- Die erwogene Vertiefung der Fahrrinne um bis zu einen Meter erstreckt sich insgesamt über den Streckenabschnitt von Ems-km 40,7 (Emden) bis Ems-km 74,6 (Eemshaven).
- In diesem rund 34 km langen Vorhabensbereich soll die bestehende Fahrrinnensohle ohne lagemäßige Veränderungen abgesenkt werden.
- Zusätzlich zu der Zunahme der Solltiefen ist kurz unterhalb der Hafeneinfahrt Emden (zwischen Ems-Kilometer 41,2 und 42,1) eine Verbreiterung der Fahrrinne zur Wendestelle zu berücksichtigen.
- Zur Minimierung der ausbaubedingten Änderungen sind im Vorfeld zu dieser Untersuchung unterschiedliche Strombaumaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht worden (BAW, 2011). Als Ergebnis dieser Untersuchung umfasst der geplante Ausbau auch eine Querschnittseinengung durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 auf Höhe Ems-Kilometer 47.

Diese Untersuchungen werden auf der Grundlage von drei Oberwasserzufluss-Szenarien durchgeführt:

1. M2 – Mittlerer Abfluss,
2. M1 – Häufigster Abfluss und
3. S1 – Niedriger Abfluss.



Die hochaufgelöste Modelltopographie des planerischen Sollzustandes PS2 sowie des Ausbauzustandes AZ1 der Unter- und Außenems wird auf der Grundlage der Topographie von 2010 unter Berücksichtigung bereits genehmigter sowie in Planung befindlicher Vorhaben erzeugt.

Aus dem Vergleich der Tidekenngößen im Ausbauzustand AZ1 mit den gleichen Kenngößen im planerischen Sollzustand PS2 ergeben sich die folgenden ausbaubedingten Änderungen:

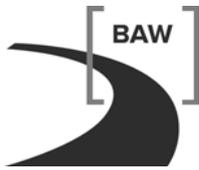
Wirkung des Ausbaus auf den Wasserstand

Im Emdener Fahrwasser von Emden bis zur Querschnittseinengung nimmt der Tidehub um 1 bis 2 cm ab, in der Unterems und im Dortmund-Ems-Kanal (DEK) bis Herbrum beträgt die Abnahme bis zu 1 cm. Das Tideniedrigwasser steigt von der Querschnittseinengung in Richtung Oberstrom im Emdener Fahrwasser um bis zu 2 cm und in der Unterems und im DEK bis zu 1 cm an. Das Tidehochwasser nimmt oberstromseitig im Mittel um weniger als 1 cm ab.

Seewärts von der Querschnittseinengung nimmt der Tidehub zu. Die Zunahme des Tidehubs beträgt im Emdener Fahrwasser seewärts der Querschnittseinengung bis zu 1 cm, in der Außenems deutlich weniger als 1 cm. Das Tidehochwasser nimmt tendenziell zu, aber deutlich weniger als 1 cm. Das Tideniedrigwasser sinkt im Emdener Fahrwasser seewärts der Querschnittseinengung um bis zu 1 cm ab, in der Außenems beträgt die Änderung deutlich weniger als 1 cm.

In der Unterems und im DEK schwächt sich die Tidehub reduzierende Wirkung der Querschnittseinengung mit abnehmendem Oberwasserzufluss ab, bleibt aber qualitativ auch für niedrigen Oberwasserzufluss erhalten.

Bei geöffnetem Ledasperrwerk reichen die Änderungen des Wasserstandes bis in das Leda-Jümme-Gebiet hinein und sind quantitativ entsprechend den Änderungen in der Unterems: Der Tidehub und das Tidehochwasser nehmen weniger als 1 cm ab, das Tideniedrigwasser weniger als 1 cm zu. Bei geschlossenem Ledasperrwerk reichen die Änderungen des Tidehochwassers entsprechend bis zum Ledasperrwerk.



Wirkung des Ausbaus auf die Strömungsgeschwindigkeiten

Die ausbaubedingten Änderungen der Strömung werden für alle untersuchten Oberwasserzufluss-Szenarien durch die folgenden geplanten Einzelmaßnahmen geprägt:

1. Querschnittseinengung in Folge der Verlängerung des Bühnenpaares 6/7
2. Verbreitung zur Wendestelle
3. Veränderter Übergang zur Unterems

Dabei ist die Querschnittseinengung diejenige mit der größten Einzelwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeiten:

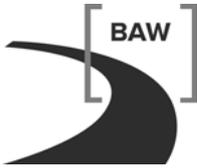
- Im Abschnitt wenige Kilometer stromauf und stromab von der Querschnittseinengung findet eine Konzentration der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fahrrinne statt und im ufernahen Bereich im Strömungsschatten der Querschnittseinengung reduzieren sich die Strömungsgeschwindigkeiten.
- Zunahme der maximalen und mittleren Flutstromgeschwindigkeit in der Fahrrinne von der Querschnittseinengung bis wenige Kilometer stromaufwärts. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,3 m/s, die mittlere Flutstromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,2 m/s.
- Zunahme der maximalen und mittleren Ebbestromgeschwindigkeit in der Fahrrinne von der Querschnittseinengung bis wenige Kilometer stromabwärts. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,35 m/s, die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,25 m/s.

Weitere deutliche Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrinne:

- Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Wendestelle um nicht mehr als 0,15 m/s.
- Anpassung der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich des Übergangs vom Emdener Fahrwasser zur Unterems auf Höhe Emden. Die Abnahmen der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit betragen nicht mehr als 0,2 m/s und die Zunahmen nicht mehr als 0,1 m/s.

Seewärts der geplanten Maßnahme und stromauf des Emssperrwerkes, sowie im Dollart und im Leda-Jümme-Gebiet betragen die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten weniger als 2,5 cm/s.

Die Zunahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten auf Höhe der Querschnittseinengung kann lokal zu einer Eintiefung führen und damit die geplante Wirkung



der Querschnittseinengung aufheben. Es ist deshalb notwendig, nach Herstellung der Querschnittseinengung die Entwicklung der Tiefen in diesem Abschnitt zu beobachten und ggf. eine Sohlsicherung zu verbauen. Eine Eintiefung um etwa einen halben Meter wird als unbedenklich eingestuft.

Wirkung des Ausbaus auf die Salzverteilung

Größtenteils ist die ausbaubedingte Veränderung des Salzgehalts eine Reaktion auf die ausbaubedingten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Mit der Strömung wird Salz transportiert und Veränderungen der Strömung führen zu Veränderungen im Salz-Transport.

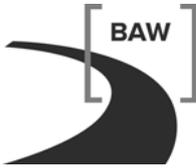
Je niedriger der Oberwasserzufluss, desto weiter nach stromauf ist die oberstromseitige Grenze der Brackwasserzone verschoben. Entsprechend verlagern sich mit abnehmendem Oberwasserzufluss die ausbaubedingten Änderungen nach Oberstrom.

Wirkung des Ausbaus auf den minimalen Salzgehalt:

- Der minimale Salzgehalt wird im Emden Fahrwasser und in der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone zunehmen. Die Zunahme hat im Emden Fahrwasser ihr Maximum mit im Mittel 0,8 PSU. Zwischen Emssperrwerk und Terborg klingen die Zunahmen des minimalen Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab.
- Seewärts der Querschnittseinengung wird die Zunahme des minimalen Salzgehalts reduziert bis hin zu einer Abnahme des minimalen Salzgehalts auf Höhe Knock um etwa 0,3 PSU im Mittel. Zwischen Knock und Dukegat klingen die Abnahmen des minimalen Salzgehalts betragsmäßig auf einen Wert unter 0,1 PSU ab.
- Im Dollart sind Zunahmen des minimalen Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, im Dollartmund bedingt durch eine veränderte Zirkulation über den Geiseleitdamm bis zu 0,4 PSU.

Wirkung des Ausbaus auf den maximalen Salzgehalt:

- In der Unterems nimmt der maximale Salzgehalt ab Pogum bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone zu. Die Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems hat ihr Maximum von im Mittel 0,4 PSU zwischen dem Emssperrwerk und Terborg. Zwischen Terborg und Leerort klingen die Zunahmen des maximalen Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab.
- In der Leda nimmt der maximale Salzgehalt auch bei niedrigem Oberwasserzufluss weniger als 0,1 PSU zu.



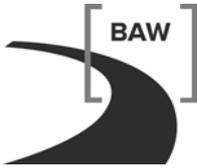
- Im Emden Fahrwasser nimmt der maximale Salzgehalt um 0,1 PSU bis 0,2 PSU ab.
- Seewärts vom Emden Fahrwasser sind keine Änderungen des maximalen Salzgehalts zu erwarten, die dem Betrag nach größer als 0,1 PSU sind.
- Im Dollart sind Zunahmen des maximalen Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, die zum Dollartmund hin abnehmen.

Wirkung des Ausbaus auf den mittleren Salzgehalt:

- Der mittlere Salzgehalt wird im Emden Fahrwasser und in der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone angehoben. Zwischen Emssperrwerk und Leerort klingen die Zunahmen des mittleren Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab. Nur in einem kurzen Abschnitt zwischen der Querschnittseinengung und Knock reduziert sich der mittlere Salzgehalt geringfügig.
- Die Höhe der Zunahmen für den mittleren Salzgehalt sind abhängig vom Oberwasserzufluss. Auf Höhe des Emssperrwerkes ist das Maximum der Zunahmen für die Unterems zu finden. Das Maximum der Zunahmen liegt im Mittel zwischen 0,2 PSU (mittlerer Oberwasserzufluss) und 0,3 PSU (niedriger Oberwasserzufluss).
- Im Emden Fahrwasser dagegen werden die Zunahmen mit abnehmendem Oberwasserzufluss immer kleiner. Bei mittlerem Oberwasserzufluss betragen die Zunahmen im Mittel bis zu 0,3 PSU, überschreiten aber bei niedrigem Oberwasserzufluss nur nahe der Wendestelle den Schwellenwert von 0,1 PSU.
- Seewärts von Knock sind keine Änderungen des mittleren Salzgehalts zu erwarten, die dem Betrag nach größer als 0,1 PSU sind.
- Im Dollart sind Zunahmen des mittleren Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, die zum Dollartmund hin abnehmen.

Die ausbaubedingte Zunahme des minimalen, mittleren und maximalen Salzgehalts in der Unterems lässt sich auch als eine Verlagerung der Brackwasserzone nach Oberstrom deuten:

- Zwischen Pogum und Papenburg verschiebt sich die Brackwasserzone in Richtung Oberstrom. Im Abschnitt Pogum bis Jemgum zwischen 0,2 km und 0,7 km. Weiter stromauf klingt die horizontale Verlagerung langsam bis auf Null ab. Mit abnehmendem Oberwasserzufluss klingt die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone weiter stromauf auf Null ab.
- Zwischen Knock und Pogum verschiebt sich die Brackwasserzone um bis zu 1 km in Richtung See, allerdings in einem Fall (Szenario M2, Isohaline 21 PSU) um fast 0,5 km in Richtung Oberstrom. Insgesamt ist hier eine hohe Varianz der Daten erkennbar.



- Seewärts von Knock verschiebt sich die Brackwasserzone um deutlich weniger als 500 m in Richtung Nordsee. Der Einfluss des Oberwasserzuflusses ist gering, aber mit der Tendenz zu höherer Verschiebung bei abnehmendem Oberwasserzufluss.
- Die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone ist deutlich abhängiger vom Ort der Isohaline als vom Wert der Isohaline. Wichtig ist also zuerst, wo sich eine Isohaline in Ems-Kilometern ausgedrückt befindet, um die horizontale Verlagerung zu quantifizieren.

Wirkung des Ausbaus auf den Schwebstoff-Haushalt

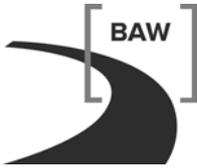
In der Unterems, sowie im Emders Fahrwasser von Emden bis zwischen Wendestelle und Querschnittseinengung nehmen der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt ab. Der Bereich der Wendestelle wirkt wie eine Senke für die Schwebstoffe. Die Wendestelle allein führt aber nicht zu einer Abnahme der Schwebstoffe in der gesamten Unterems. Ohne die Berücksichtigung der Querschnittseinengung steigt der Schwebstoffgehalt weiter stromauf ausbaubedingt an, weil ohne Querschnittseinengung in der Unterems die Tide-Asymmetrie zunimmt und die anfängliche Abnahme des Schwebstoffgehalts aufgezehrt wird und sich weiter stromauf in eine Zunahme des Schwebstoffgehalts verkehrt. Mit der Querschnittseinengung nimmt der Tidehub in der Unterems ab, die Tide-Asymmetrie nimmt ab und die Abnahme des Schwebstoffgehalts erfolgt in der gesamten Unterems, im DEK bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet.

Mit abnehmendem Oberwasserzufluss verringert sich die Abnahme des Schwebstoffgehalts in der Unterems und im Emders Fahrwasser. Die Abnahme des Schwebstoffgehalts in der Unterems und im Emders Fahrwasser bleibt aber qualitativ auch bei niedrigem Oberwasserzufluss erhalten.

Der Ausbau wird im Grundsatz die Situation hohen Schwebstoffgehalts in der Unterems nicht nennenswert verändern, dazu sind die ausbaubedingten Änderungen zu gering.

In der Außen- und Unterems werden sowohl der Flut-, als auch der Ebbe-Transport von Schwebstoffen verringert. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt wenige Kilometer stromauf und stromab von der Querschnittseinengung. Hier sind die Flut- bzw. die Ebbestromgeschwindigkeiten ausbaubedingt erhöht, entsprechend nehmen die Bodenschubspannungen, der Schwebstoffgehalt und in Folge auch der Flut- und Ebbestrom-Schwebstofftransport zu.

Stromauf von Terborg nehmen Flut- und Ebbe-Transport zu, wenn die Querschnittseinengung unberücksichtigt bleibt. Nur mit Querschnittseinengung wird der Flut-



und Ebbe-Transport von Schwebstoffen in der Unterems, im Leda-Jümme-Gebiet und im DEK bis Herbrum verringert.

In Unterems wird die vorhandene Flut-Dominanz des Netto-Schwebstofftransportes durch den Ausbau tendenziell verringert. Die Reduzierung der Flut-Dominanz nimmt in Richtung oberstrom ab. Sie bleibt auch bei niedrigem Oberwasserzufluss qualitativ erhalten, schwächt sich jedoch mit abnehmendem Oberwasserzufluss deutlich ab. Das Maximum der ausbaubedingten Reduzierung reduziert sich im Vergleich zwischen dem maximalen und minimalen untersuchten Oberwasserzufluss um ca. 30%.

Morphologische Änderungen bleiben im Wesentlichen lokal begrenzt: Zusätzliche Sedimentationsgebiete sind die Wendestelle, der Vorhafen Emden und der Bereich im Stromschatten der Querschnittseinengung. Erosion ist im Bereich der Querschnittseinengung möglich. Darüber hinaus sind die morphologischen Änderungen sehr gering. So werden im Dollart und in der Außenems allein aus den oben genannten Gründen keine messtechnisch erfassbaren morphologischen Änderungen feststellbar sein.

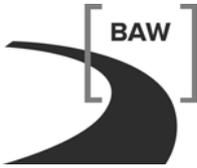
In der Unterems werden die Flachwasserbereiche und Hafenzufahrten tendenziell langsamer aufsedimentieren, aber auch diese Veränderung wird so gering ausfallen, dass sie messtechnisch nicht erfassbar sein wird.

Die langfristigen ausbaubedingten morphologischen Änderungen hängen in erster Linie vom zukünftigen Handeln des Sedimentmanagements ab.

Wirkung des Ausbaus auf die Unterhaltungsbaggerung

Die ausbaubedingten Veränderungen des Schwebstofftransportes zeigen eine Verstärkung des flutstromorientierten Nettotransportes im Bereich Knock von ca. 100 t/Tide an. Im Übergang zur Unterems wird hingegen der Nettotransport durch die Maßnahmen im Emdener Fahrwasser (Vertiefung, Verlängerung der Buhnen, Wendestelle) um ca. 500 t/Tide reduziert. Beide betrachteten Bilanzprofile weisen auf eine Erhöhung der Baggermengen im Emdener Fahrwasser um etwa 10% hin: Es kommt mehr von Unterstrom herein und es geht weniger nach Oberstrom hinaus. Innerhalb des Emdener Fahrwassers werden sich durch die Maßnahmen Baggerschwerpunkte verändern. Im Bereich der Querschnittseinengung durch die Buhnen werden die Baggermengen etwas sinken, sofern die hydraulische Wirkung, so wie sie hier festgestellt wurde, erhalten bleibt. Weiter oberhalb im Bereich der neuen Wendestelle und weiter unterhalb im Bereich Gattjebogen werden die Unterhaltungsaufwendungen jedoch deutlich ansteigen.

Für die Unterems weisen die Ergebnisse als unmittelbare Systemreaktion zunächst auf einen geringeren Sedimenteintrag hin. Das Emdener Fahrwasser insgesamt wirkt als Sedimentfalle, was sich für die Unterems aber nur dann als vorteilhaft erweisen würde, wenn dieser Ab-



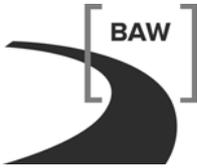
schnitt konsequent in der Art unterhalten wird, dass die Schwebstoffkonzentrationen dauerhaft verringert werden. Akkumulieren jedoch Sedimente im Emden Fahrwasser im Laufe der Zeit derart, dass die Schwebstoffkonzentrationen wieder zunehmen, werden auch die Unterhaltungskosten in der Unterems als unmittelbare Folge weiter ansteigen. Das bedeutet, dass die hydraulische Wirkung der Querschnittseinengung dauerhaft gewährleistet sein muss und dass die Sedimentationswirkung der Wendestelle erhalten bleiben muss.

Im Bereich Gatjebogen muss ebenfalls mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden, da dieser Bereich am stärksten vertieft wird und sowohl von Unterstrom als auch aus dem Bereich der Querschnittseinengung vermehrt Sedimente eingetragen werden. Die ausbaubedingten Veränderungen der Baggermengen in der Außenems unterhalb des Gatjebogens sind deutlich kleiner. Im Bereich südlich der Unterbringungsorte wird der Flutstromtransport etwas verstärkt, so dass stromauf dieses Bereiches die Unterhaltungsbaggermengen ansteigen können.

Der geplante Ausbau hat auf die Wirksamkeit der hier untersuchten Unterbringungsorte kaum einen Einfluss. Das zukünftige Sedimentmanagement wird nach dem Ausbau bei gleichbleibender Strategie insgesamt um ca. 10% erhöhte Baggermengen bewältigen müssen. Die Baggerschwerpunkte innerhalb des Emden Fahrwassers verschieben sich. Im Bereich der Wendestelle und im Gatjebogen werden die Baggermengen stärker ansteigen. Die Kapazität der Klappstellen 5 und 7 ist für eine entsprechend stärkere Beaufschlagung ausreichend. Dadurch wird jedoch der Sedimentkreislauf weiter verstärkt.

Grundsätzlich findet unabhängig von der Unterhaltungsstrategie ein stetiger Import von Sediment statt. Eine moderat veränderte Strategie wird keine unmittelbaren Erfolge zeigen, da nur ein kleiner Teil des Sedimenttransportes verändert wird. So verringert die Nutzung der Klappstelle K2 den Wiedereintrieb des Baggergutes, da ein größerer Anteil in den Dollart transportiert wird. Auch die Entnahme des Baggergutes verringert den Wiedereintrieb. Beide Maßnahmen ändern aber kurzfristig nur wenig an dem alltäglichen Sedimentimport in das System.

Langfristige großräumige morphologische Veränderungen im Bereich der Unter- und Außenems sowie der Zufahrten zu den Häfen wird der geplante Ausbau der Außenems bis Emden nicht verursachen. Die unmittelbaren Auswirkungen dieser Maßnahme sind im Wesentlichen lokal begrenzt. Die langfristigen ausbaubedingten morphologischen Veränderungen hängen in erster Linie vom zukünftigen Handeln des Sedimentmanagements ab. Hierzu sei auf parallel stattfindende Untersuchungen verwiesen (BAW, 2012c).

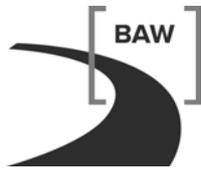


Wirkung des Ausbaus auf die Wassertemperatur

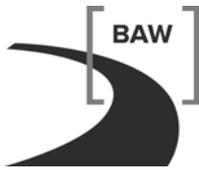
Die ausbaubedingte Änderung der Wassertemperatur im Ems-Ästuar wird den Schwellenwert von $\pm 0,1$ K nicht erreichen oder überschreiten.

Wirkung des Ausbaus auf den Seegang

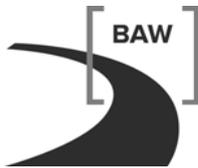
Durch den geplanten Ausbau der Außenems wird es, bedingt durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Seegang, Topographie und Strömung örtlich differenziert sowie ereignisabhängig, in der Tendenz sowohl zu Zu- als auch zu Abnahmen der Wellenhöhen kommen. Die maximalen ausbaubedingten Änderungen der Wellenhöhe liegen dem Betrage nach unter 0,10 m. Dasselbe gilt für die Wellenperioden T_{m02} . Hier werden Änderungen dem Betrag nach bis zu 1 s erwartet.



Bundesanstalt für Wasserbau
Vertiefung der Außenems bis Emden
Ausbaubedingte Änderungen für Hydrodynamik, Transport und Seegang
BAW-Nr. A3955 03 10144 – September 2012



Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	3
3	Beschreibung der geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden	5
4	Planerische Zustände	7
4.1	Planerischer Sollzustand 1 (PS1) – Erlaubte und genehmigte Projekte	7
4.2	Planerischer Sollzustand 2 (PS2) – Parallel in Planung befindl. Projekte	8
4.3	Ausbauzustand (AZ1)	9
5	Hydrodynamisch-numerisches Modell der Tideems	11
5.1	Mathematisches Verfahren UnTRIM	11
5.2	Gitternetz des Tideems-Modells	12
5.3	Modellsteuerung	14
5.3.1	Seerandsteuerung	14
5.3.2	Oberwasserzufluss	15
5.3.3	Anfangsverteilung und Steuerung des Salzgehalts	15
5.3.4	Anfangsverteilung und Steuerung der Wassertemperatur	16
5.3.5	Anfangsverteilung und Steuerung der Sedimentfraktionen	17
5.4	Kalibrierung und Validierung des HN-Modells	17
5.4.1	Wasserstand	18
5.4.2	Salzgehalt	25
5.4.3	Schwebstoffgehalt und –Transport	29
5.4.4	Von der Modellkalibrierung zur wasserbaulichen Systemanalyse	38
6	Untersuchungskonzept	41
6.1	Oberwasserzufluss-Szenarien	41
6.1.1	M2 – Mittlerer Abfluss	41
6.1.2	M1 – Häufigster Abfluss	42
6.1.3	S1 – Niedriger Abfluss	43
6.1.4	Anfangssalzgehalt	43
6.1.5	Temperatursteuerung	44
6.2	Bestimmung der ausbaubedingten Änderung	46
6.2.1	Flächenhafte Darstellung von Analysegrößen	46
6.2.2	Darstellung im Längs- und Querschnitt	47
6.2.3	Darstellung Querprofil-integrierter Tidekennwerte im Längsschnitt	48



7	Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Hydrodynamik	49
7.1	Die neue Solltiefe	49
7.2	Wirkung des Ausbaus auf den Wasserstand	50
7.2.1	Wirkung der Vertiefung der Fahrrinne und der Wendestelle	50
7.2.2	Wirkung des Ausbaus inkl. Querschnittseinengung	51
7.3	Wirkung des Ausbaus auf die Strömungsgeschwindigkeiten	53
7.3.1	Wirkung der Vertiefung der Fahrrinne und der Wendestelle	53
7.3.2	Wirkung des Ausbaus inkl. Querschnittseinengung	54
8	Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Salzverteilung	63
8.1	Theoretische Grundlagen	63
8.2	Wirkung des Ausbaus auf den minimalen Salzgehalt	65
8.3	Wirkung des Ausbaus auf den maximalen Salzgehalt	68
8.4	Wirkung des Ausbaus auf den mittleren Salzgehalt	72
8.5	Horizontale Verlagerung der Brackwasserzone	74
9	Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Schwebstoff-Haushalt	79
9.1	Beschreibung des Vergleichszustands PS2	79
9.2	Wirkung des Ausbaus auf den Schwebstoffgehalt	82
9.3	Wirkung des Ausbaus auf den Schwebstofftransport	84
9.4	Wirkung des Ausbaus auf Sedimentation und Erosion	88
10	Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Unterhaltungsbaggerung	89
10.1	Untersuchungskonzept	89
10.2	Baggerbereiche und Unterbringungsorte	90
10.3	Analyse der Unterbringungsorte	92
10.4	Simulation und Analyse aktueller und alternativer Unterhaltungsstrategien	98
10.5	Die Unterhaltungsstrategie im Ausbauzustand	109
10.6	Wirkung des Ausbaus auf die Baggermengen	115
11	Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Wassertemperatur	117
12	Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Seegang	123
12.1	Mathematische Verfahren	123
12.2	Seegangmodell der Ems	123
12.3	Validierung des Seegangmodells	127
12.4	Ausbaubedingte Änderung des Seegangs	129
13	Literaturverzeichnis	137

Bildverzeichnis

Seite

Bild 1: Das Modellgebiet des HN-Modells der Tideems	13
Bild 2: Gemessene Wasserstandsganglinie des Pegels Huibertgat	14
Bild 3: Oberwasserzufluss für den Pegel Versen (gesamt)	15
Bild 4: Wasserstandsvergleich für den Pegelstandort Terborg	18
Bild 5: Vergleich Messung vs HN-Modell des Tidehochwassers	20
Bild 6: Vergleich Messung vs HN-Modell des Tideniedrigwassers	20
Bild 7: Vergleich Messung vs HN-Modell der Laufzeit des Tidehochwassers	21
Bild 8: Überlagerung einer M2- mit einer M4-Tide	22
Bild 9: Überlagerung einer M2- mit einer M6-Tide	23
Bild 10: Vergleich Messung vs HN-Modell des Amplitudenverhältnisses M4:M2 u. M6:M2	24
Bild 11: Vergleich Messung vs HN-Modell der Phasenverschiebung M4:M2 und M6:M2	24
Bild 12: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Borkum-Südstrand	26
Bild 13: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Emden	27
Bild 14: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Terborg	27
Bild 15: Vergleich Messung vs HN-Modell der Tidekennwerte des Salzgehalts	29
Bild 16: Ausschnitt der Topographie des Modells für den Ist-Zustand 2010	31
Bild 17: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen entlang der Fahrrinne der Ems	33
Bild 18: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen im Bereich der Klappstelle 5	33
Bild 19: Querschnittsgemittelte Ergebnisse der Ganztidenmessung stromauf Klappstelle 7	34
Bild 20: Querschnittsgemittelte Ergebnisse der Ganztidenmessung bei Gandersum	35
Bild 21: Mittlere Schwebstoffkonzentrationen (Modell Ist 2010) in der Außenems	36
Bild 22: Mittlerer advektiver Rest-Schwebstofftransport in der Außenems	36
Bild 23: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport bei Flutstrom	37
Bild 24: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport bei Ebbestrom	37
Bild 25: Häufigkeitsverteilung für Tagesmittelwerte des Abflusses Versen (Gesamt)	42
Bild 26: Tiefengemittelter Salzgehalt in Fahrinnenmitte für den plan. Sollzustand PS1	44
Bild 27: Berücksichtigte Entnahmen und –Einleitungen zur Kühlung von Kraftwerken	45
Bild 28: Lage der im HN-Modell definierten Querprofile	47
Bild 29: Im HN-Modell durchgeführte Vertiefungen zur Herstellung der geplanten Solltiefe	49
Bild 30: Ausbaubedingte Änderung des Tidehubs in Fahrinnenmitte	50
Bild 31: Ausbaubedingte Änderung des Tideniedrigwassers in Fahrinnenmitte	52
Bild 32: Ausbaubedingte Änderung des Tidehochwassers in Fahrinnenmitte	53
Bild 33: Wasserstand, Durchfluss und ausbaubedingte Änderung des Durchflusses	54
Bild 34: Ausbaubedingte Änderung der max. Flutstromgeschwindigkeit in Fahrinnenmitte	56
Bild 35: Ausbaubedingte Änderung der max. Ebbestromgeschwindigkeit i. Fahrinnenmitte	57
Bild 36: Ausbaubedingte Änderung der mit. Flutstromgeschwindigkeit in Fahrinnenmitte	58
Bild 37: Ausbaubedingte Änderung der mit. Ebbestromgeschwindigkeit in Fahrinnenmitte	59
Bild 38: Ausbaubedingte Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit (Draufsicht)	60
Bild 39: Ausbaubedingte Änderung der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (Draufsicht)	60

Bild 40: Ausbaubedingte Änderung des minimalen Salzgehalts in Fahrrinnenmitte	66
Bild 41: Ausbaubedingte Änderung des minimalen Salzgehalts (Draufsicht)	67
Bild 42: Ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehalts in Fahrrinnenmitte	69
Bild 43: Ausbaubedingte mittlere Änderung des maximalen Salzgehalts in der Leda	70
Bild 44: Ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehalts (Draufsicht)	71
Bild 45: Ausbaubedingte Änderung des mittleren Salzgehalts in Fahrrinnenmitte	73
Bild 46: Ausbaubedingte Änderung des mittleren Salzgehalts (Draufsicht)	74
Bild 47: Horizontale Verlagerung der Brackwasserzone	77
Bild 48: Max. und mit. Schwebstoffgehalt für Zustand PS2 in Fahrrinnenmitte	79
Bild 49: Querschnittsintegr. adv. Schwebstofftransport für Zustand PS2 im Längsschnitt	80
Bild 50: Ausbaubedingte Änderung des maximalen Schwebstoffgehalts in Fahrrinnenmitte	82
Bild 51: Ausbaubedingte Änderung des mittleren Schwebstoffgehalts in Fahrrinnenmitte	83
Bild 52: Ausbaubedingte Änderung des advektiven Flutstrom-Schwebstofftransports	85
Bild 53: Ausbaubedingte Änderung des advektiven Ebbstrom-Schwebstofftransports	86
Bild 54: Ausbaubedingte Änderung des advektiven residuellen Schwebstofftransports	87
Bild 55: Jährliche Baggermengen in der Außenems von 1982 – 2010	91
Bild 56: Niederländische und deutsche Unterbringungsorte im Ems-Dollart-Gebiet	91
Bild 57: Jährliche Beaufschlagung der einzelnen Unterbringungsorte	92
Bild 58: Der advektive Rest-Schwebstofftransport Einflussbereich Klappstelle 5	94
Bild 59: Der advektive Rest-Schwebstofftransport Einflussbereich Klappstelle 7	95
Bild 60: Der advektive Rest-Schwebstofftransport Einflussbereich Klappstelle K2	96
Bild 61: Differenztopographie der digitalen Geländemodelle 2010 und 2005	98
Bild 62: Steuerung von Baggerereignissen in DredgeSim	99
Bild 63: Variante 0II – Referenz: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes	102
Bild 64: Variante CII – Referenz: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes	103
Bild 65: Variante 0II – Referenz: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration	104
Bild 66: Variante CII – Referenz: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration	104
Bild 67: Variante CII – Variante 0II: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes	106
Bild 68: Variante E – Variante 0: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes	107
Bild 69: Variante CII – Variante 0II: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration	108
Bild 70: Variante E – Variante 0: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration	108
Bild 71: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Schwebstofftransportes für Szenario 0II	111
Bild 72: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Schwebstofftransportes für Szenario CII	112
Bild 73: Ausbaubedingte Änderung der max. Schwebstoffkonzentration für Szenario 0II	113
Bild 74: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Geschiebetransportes für Szenario CII	113
Bild 75: Tiefenänderung für das Szenario 0II am Ende des Simulationszeitraumes	114
Bild 76: Tiefenänderung für das Szenario CII am Ende des Simulationszeitraumes	114
Bild 77: Ausbaubedingte Änderung der maximalen Wassertemperatur in Fahrrinnenmitte	118
Bild 78: Ausbaubedingte Änderung der mittleren Wassertemperatur in Fahrrinnenmitte	118
Bild 79: Ausbaubedingte Änderung der minimalen Wassertemperatur in Fahrrinnenmitte	118
Bild 80: Ausbaubedingte Änderung der maximalen Wassertemperatur (Draufsicht)	119

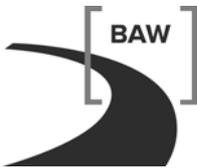
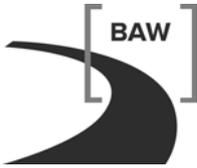


Bild 81: Ausbaubedingte Änderung der mittleren Wassertemperatur (Draufsicht)	120
Bild 82: Ausbaubedingte Änderung der minimalen Wassertemperatur (Draufsicht)	121
Bild 83: Topographie des Seegangsmodells der Ems	124
Bild 84: Windgeschwindigkeiten bei Borkum (2.10.2009 bis 22.10.2009)	125
Bild 85: Windgeschwindigkeiten bei Emden (2.10.2009 bis 22.10.2009)	125
Bild 86: Wasserstand am Pegel Borkum Fischerbalje (2.10.2009 bis 22.10.2009)	126
Bild 87: Wasserstand am Pegel Emden Neue Seeschleuse (2.10.2009 bis 22.10.2009)	126
Bild 88: Vergleich für Messstation Borkum für sig. Wellenhöhe und Wellenperiode	128
Bild 89: Vergleich für Messstation Paapsand für sig. Wellenhöhe und Wellenperiode	128
Bild 90: Vergleich für Messstation Emder Fahrw. für sig. Wellenhöhe und Wellenperiode	129
Bild 91: Topographie des planerischen Sollzustands PS2	130
Bild 92: Differenztopographie Ausbauzustand – planerischer Sollzustand PS2	130
Bild 93: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Borkum	131
Bild 94: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Paapsand	131
Bild 95: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Emder Fahrwasser	132
Bild 96: Wellenperiode T_{m02} an der Messstation Emder Fahrwasser	132
Bild 97: Maximale signifikante Wellenhöhe für den planerischen Sollzustand PS2	134
Bild 98: Differenz der maximalen signifikanten Wellenhöhe	134
Bild 99: Differenz der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten	134

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Beschreibung der betrachteten Zustände und Differenzen	7
Tabelle 2: Stützwerte für die Interpolation des Anfangssalzgehalts	16
Tabelle 3: Anteil der verwendeten Sedimentfraktionen am Bodenvorrat	17
Tabelle 4: Vergleich Messung vs HN-Modell für Th_w , Tn_w und Th_b	19
Tabelle 5: Verwendete Bodenzusammensetzung	30
Tabelle 6: Parameter-Einstellungen des verwendeten HN-Modells für die Ems	39
Tabelle 7: Oberwasserzufluss-Szenarien und die zugehörigen Abflüsse	41
Tabelle 8: Ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone	76
Tabelle 9: Szenarien im Sedimentmanagement (Emsmodell 2010)	100

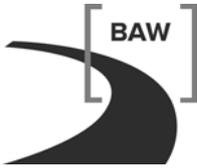


Anlagenverzeichnis

Anlagenband

A: Planerischer Sollzustand PS1 und kumulative Effekte

B: Planerischer Sollzustand PS2 und ausbaubedingte Änderungen



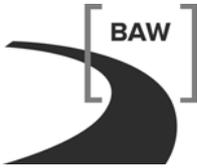
1 Veranlassung und Aufgabenstellung

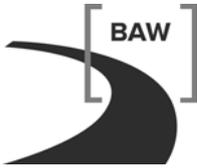
Der Hafen Emden kann auf eine sehr positiv verlaufende Umschlagsentwicklung insbesondere beim Umschlag von Massen- und Stückgut (Fahrzeuge und Zellulose) verweisen. In seiner Prognose für das Jahr 2025 geht PLANCO von einem Gesamtumschlag von rd.6.5 Mio. t aus. Analog hierzu lässt auch die Entwicklung der Schiffsgrößen auf der Außenems speziell im RoRo- und im Bulkverkehr ein kontinuierliches Wachstum erkennen. Nur ein Teil dieser Schiffe kann gegenwärtig tideunabhängig verkehren. Nach PLANCO ist die Zahl der tideabhängigen Fahrten von 182 in 2002 auf 323 in 2006 kontinuierlich angestiegen und hat sich damit innerhalb von vier Jahren nahezu verdoppelt. Das Land Niedersachsen und die Emdener Hafenwirtschaft streben daher eine Vergrößerung der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt zum Emdener Hafen um mindestens einen Meter an und sind gegenüber dem BMVBS bereits am 26.02.2002 entsprechend initiativ geworden. Im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung nach den Grundsätzen und Kriterien der Bundesverkehrswegeplanung wurden zwischen 2006 und 2007 Ausbaualternativen auf der Grundlage nautischer, technischer, hydraulischer, wirtschaftlicher und ökologischer Anforderungen, Erfahrungen und Erkenntnisse mit abschließendem Vorschlag einer Vorzugs- bzw. Zielvariante erarbeitet. Im Ergebnis ist eine Vertiefung der Außenems um bis zu einem Meter in der ganzheitlichen Betrachtung verkehrlich begründet (WSA Emden, 2012a).

Im Rahmen der Planungen für die Vertiefung der Außenems bis Emden beauftragte das Wasser und Schifffahrtsamt (WSA) Emden, Projektsteuerung Tideems, die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Juli 2008, die Auswirkungen der Fahrrinnenvertiefung auf die Hydrodynamik, die Salzintrusion, den Schwebstoffgehalt und -transport, die Wassertemperatur, den Seegang, die Sturmflutkenngößen und das Sedimentmanagement zu begutachten. Im April 2009 folgte der Auftrag zur Begutachtung der schiffserzeugten Belastungen.

Grundlage der wasserbaulichen Systemanalyse zur detaillierten Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen ist die *Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. § 5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)* (WSD Nord-West, 2009).

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zu den Teilaspekten Hydrodynamik, Salzintrusion, Schwebstoffgehalt und -transport, Sedimentmanagement, Wassertemperatur und Seegang. Der Betrachtungsraum wird gemäß Anlage Karte 10 der Unterlage zum Scoping-Termin nach §5 UVPG (WSA Emden, 2008) definiert. In weiteren Gutachten der BAW werden die Teilaspekte Sturmflut (BAW, 2012a) und schiffserzeugte Belastungen (BAW, 2012b) behandelt.





2 Unterlagen und Daten

Topographische Daten für die Erstellung der Modelltopographie:

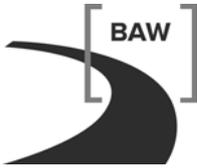
1. Digitales Geländemodell 2010 (DGMW 2010) des WSA Emden (ARGE Unter-/Außenems, 2012) mit Grundlage Peilung und Befliegung 2010.
2. Ausbautiefen für die Anpassungsmaßnahmen an der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe (BAW, 2007).
3. Ausbautiefen für die geplante Anpassung der Zufahrt nach Eemshaven (RWS, 2006).
4. Ausbautiefen für die Planänderung der Zufahrt zum Emspier (Datenaustausch mittels CD vom WSA Emden vom 3. Mai 2011)
5. Ausbautiefen für die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden nach Feinbemessung durch das WSA Emden (Email vom WSA Emden vom 6. Juli 2011).

Zur Steuerung des HN-Modells während des Zeitraums April und Mai 2010 werden folgende Daten verwendet:

- Wasserstandsentwicklung am Pegel Huibertgat für 2010 in 10-Minuten-Werten.
- Gemessener Oberwasserzufluss der Ems bei Versen
- Oberwasserzufluss von Leda und Jümme
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Weser/Ems 2007 (NLWKN 2011)

Zusätzlich lagen folgende Daten vor:

- Wasserstandsmessungen des Jahres 2010 an den Pegelstandorten Huibertgat (NL), Borkum/ Südstrand, Borkum/ Fischerbalje, Memmert, Norderney (Riffgat), Emshörn, Dukogat, Knock, Delfzijl (NL), Emden/ Neue Seeschleuse, Pogum, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg, Rhede, Herbrum, Ledasperrwerk (Leda), Wiltshausen (Leda), Potshausen (Leda) und Dreyschloot (Leda)
- Salzgehaltsmessungen von April bis Juni 2010 an den Pegelstandorten Borkum/ Südstrand, Emshörn, Gatjebogen, Knock, Emden/ Westmole, Pogum, Ditzum, Gandersum, Terborg, Leerort, Grotgaste, Weener, Mark, Papenburg, Rhede, Herbrum, Leer (Leda)
- Trübungsmessungen von April bis Juni 2010 an den Pegelstandorten Knock, Gandersum, Terborg, Leerort, Weener und Papenburg
- Oberwasserzuflussmessungen am Pegelstandort Versen/ Wehrdurchstich von Januar 1941 bis Oktober 2011 vom WSA Meppen



- Bodenproben: Niederländisches Kataster für Außenems und Dollart (RIKZ) und Proben entlang der Unterems und des Emders Fahrwassers für jeden Ems-Kilometer von Papenburg bis Ems-KM-55 (WSA Emden, 2005)
- Seegangsmessungen an den Messpositionen Borkum, Paapsand und Emders Fahrwasser (IMS, 2010)

3 Beschreibung der geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden

Die Projektbeschreibung des WSA Emden (WSA Emden, 2012a) enthält alle notwendigen Informationen zur geplanten Maßnahme:

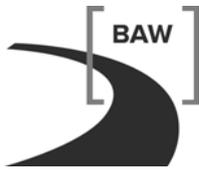
- Die erwogene Vertiefung der Fahrrinne um bis zu einen Meter erstreckt sich insgesamt über den Streckenabschnitt von Ems-km 40,7 (Emden) bis Ems-km 74,6 (Eemshaven).
- In diesem rund 34 km langen Vorhabensbereich soll die bestehende Fahrrinnensohle ohne lagemäßige Veränderungen abgesenkt werden.
- Die vorhandenen Fahrrinnenbreiten werden im Rahmen dieses Verfahrens in den einzelnen Streckenabschnitten nicht verändert.
- Kurvenaufweitungen sind ebenfalls nicht vorgesehen.
- Darüber hinaus besteht aus nautischer Sicht kein Erfordernis, den derzeitigen Verlauf der Fahrrinnenstrasse zu modifizieren.

Die Fahrrinntiefen und -breiten im Längsschnitt der Ems sind in Anlage 1 und Anlage 2 der Projektbeschreibung dargestellt. Eine zahlenmäßige Zusammenfassung findet sich ergänzend in Tabelle 3-1 der Projektbeschreibung.

Quer zur Fahrrinnenstrasse und außerhalb der Fahrrinne ist für den Abschnitt von Emden bis Ems-Kilometer 51,5 eine Böschungsneigung von 1 : 8,8 und für den Abschnitt seewärts Ems-Kilometer 51,5 bis zum Übergang zur Trasse Eemshaven eine Böschungsneigung von 1 : 13 berücksichtigt worden.

Zusätzlich zu der Zunahme der Solltiefen ist kurz unterhalb der Hafeneinfahrt Emden (zwischen Ems-Kilometer 41,2 und 42,1) eine Verbreiterung der Fahrrinne zur Wendestelle zu berücksichtigen (s.a. Kapitel 3.3.2 und Anlage 3 der Projektbeschreibung).

Zur Minimierung der ausbaubedingten Änderungen sind im Vorfeld zu dieser Untersuchung unterschiedliche Strombaumaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht worden (BAW, 2011). Als Ergebnis dieser Untersuchung umfasst der geplante Ausbau auch eine Querschnittseinengung durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 auf Höhe Ems-Kilometer 47 (s.a. Kapitel 3.3.2 und Anlage 4 der Projektbeschreibung).



Bundesanstalt für Wasserbau
Vertiefung der Außenems bis Emden
Ausbaubedingte Änderungen für Hydrodynamik, Transport und Seegang
BAW-Nr. A3955 03 10144 – September 2012

4 Planerische Zustände

Innerhalb dieser Untersuchung werden zwei planerische Zustände betrachtet, um erstens die ausbaubedingten Differenzen und zweitens die kumulative Wirkung der geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden im Zusammenwirken mit anderen geplanten Vorhaben (Summationskulisse) bestimmen zu können.

Zustand	Beschreibung
PS1	Ist-Zustand 2010 und bereits genehmigte Vorhaben (Vorbelastung)
PS2	Ist-Zustand 2010 und bereits genehmigte sowie in Planung befindliche Vorhaben
AZ1	PS2 inkl. des Ausbauvorhabens Vertiefung der Außenems bis Emden
AZ1-PS2	Wirkung des Ausbauvorhabens Vertiefung der Außenems bis Emden
AZ1-PS1	kumulative Wirkung von Ausbau und dem Zustand PS2 zugeordneten Vorhaben

Tabelle 1: Beschreibung der in diesem Gutachten betrachteten Zustände und Differenzen (aus WSA Emden, 2012b)

4.1 Planerischer Sollzustand 1 (PS1) – Erlaubte und genehmigte Projekte

Der planerische Sollzustand PS1 basiert auf dem digitalen Geländemodell 2010 (IST-2010) und enthält zusätzlich alle folgenden erlaubten und genehmigten Verfahren:

- Vertiefung der Fahrrinne zwischen Papenburg und der Nordsee auf die planfestgestellte Solltiefe, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand IST-2010 flacher ist. Vorhandene Übertiefen bleiben erhalten. Ausbautiefen für die Anpassungsmaßnahmen in der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe (BAW, 2007) sind hierin berücksichtigt.
- Vertiefung des LNG- und Wilhelmina-Hafenbeckens im Hafen Eemshaven auf die maximal erlaubte Tiefe, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand IST-2010 flacher ist.
- Sole-Einleitungen der Firmen E.ON auf Höhe der Landemole bei Rysum (900 m³/h) und EWE bei Ditzum (900 m³/h).
- Wasserentnahme der Firma E.ON auf Höhe Knock zur Kavernenherstellung (900 m³/h).
- Wasserentnahme und –wiedereinleitung der Firmen RWE (100 m³/s; +7 K) und NUON (60 m³/s; +7 K) zur Kraftwerkskühlung am Standort Eemshaven

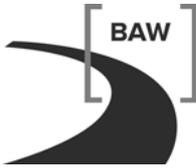
4.2 Planerischer Sollzustand 2 (PS2) – Parallel in Planung befindl. Projekte

Der planerische Sollzustand PS2 basiert auf dem Zustand PS1 und enthält zusätzlich weitere zur Zeit der Untersuchung parallel in Planung befindliche Projekte, bzw. genehmigte aber noch nicht realisierte Projekte:

- Vertiefung der Zufahrt nach Eemshaven auf die von niederländischer Seite geplante Solltiefe, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand PS1 flacher ist.
- Vertiefung der Zufahrt vom Emdener Fahrwasser zum Emispier, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand PS1 flacher ist.
- Sole-Einleitungen der Firmen Wingas und EWE (zusammen 4200 m³/h) und E.ON (2700 m³/h) auf Höhe der Landemole bei Rysum.
- Wasserentnahmen der Firmen Wingas und EWE (zusammen 3300 m³/h) und E.ON (1800 m³/h) auf Höhe Jemgum zur Kavernenherstellung.
- Wasserentnahme und –wiedereinleitung der Firma Emsmond Energie zur Kraftwerkskühlung am Standort Eemshaven (25 m³/s; +7 K).

Die Vertiefung der Zufahrt nach Eemshaven und die Sole-Einleitungen sind im Sinne einer worst-case-Betrachtung berücksichtigt worden:

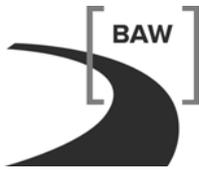
- Aktuell ist die geplante Vertiefung nach Eemshaven durch einen niederländischen Gerichtsbeschluss gestoppt worden. Trotzdem ist die geplante Vertiefung nach Eemshaven in dieser Untersuchung im planerischen Sollzustand PS2 enthalten. Die geplante Vertiefung nach Eemshaven führt dazu, dass mit vergrößertem Fahrrinnenquerschnitt und größerer Fahrrinntiefe weniger Tideenergie auf dem Weg von der Nordsee in Richtung Emden dissipiert wird. Der planerische Sollzustand PS2 mit geplanter Vertiefung der Zufahrt nach Eemshaven ist insofern ein Worst-Case-Sollzustand, weil anzunehmen ist, dass die ausbaubedingten Veränderungen durch die geplante Vertiefung der Zufahrt nach Emden tendenziell zunehmen, je höher das Ausgangsniveau der Tideenergie im Ems-Ästuar ist.
- Die Firma EWE hat die Erlaubnis zur Soleeinleitung bei Ditzum (900 m³/h, im planerischen Sollzustand PS1 eingestellt). Langfristig soll diese Soleeinleitung entfallen und ein größerer Volumenstrom bei Rysum eingeleitet werden. Für dieses Gutachten sind beide Einleitungen parallel mit vollem Volumenstrom im planerischen Sollzustand PS2 berücksichtigt worden. Damit sind sowohl die Höhe des Volumenstroms als auch der Ort der Einleitung im Sinne einer worst-case-Betrachtung berücksichtigt worden.



4.3 Ausbauzustand (AZ1)

Der Ausbauzustand AZ1 baut auf PS2 auf und enthält zusätzlich die folgenden Einzelmaßnahmen, die Bestandteil der geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden sind:

- Vertiefung der Fahrrinne auf die geplante Solltiefe, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand PS2 flacher ist. Dabei ist ein ca. 100 m langer, rampenartiger Übergang der Solltiefen in Richtung Unterems berücksichtigt.
- Berücksichtigung der maximalen Böschungsneigung, sofern die Böschungsneigung im Zustand PS2 steiler ist
- Verbreiterung der Fahrrinne im Abschnitt Ems-Kilometer 41,2 bis 42,1 zur Wendestelle auf die geplante Solltiefe, sofern die bathymetrische Tiefe im Zustand PS2 flacher ist
- Herstellung der Querschnittseinengung durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7



5 Hydrodynamisch-numerisches Modell der Tideems

Für die Untersuchung der ausbaubedingten Veränderung der Hydrodynamik der Tideems werden im Rahmen einer wasserbaulichen Systemanalyse die hydrodynamischen Zustandsgrößen sowohl für jeden der planerischen Sollzustände, als auch für den geplanten Ausbauzustand für eine ausgewählte und im folgenden gleich bleibende hydrologische Situation mit einem hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modell flächendeckend ermittelt. Die Ergebnisse sind die Grundlage für die Berechnung und die Analyse der Änderungen durch den Ausbauzustand.

Die Vorgabe gleicher hydrologischer und morphologischer Situationen sowohl für einen planerischen Sollzustand als auch für den Ausbauzustand ermöglicht die eindeutige physikalische Zuordnung von Veränderungen der Hydrodynamik durch die zu untersuchende Ausbaumaßnahme. Hierbei bildet der Zustand der Ems von 2010 die Grundlage für die Modellierung der Tideems. Bevor das gewählte numerische Modell für die Untersuchungen eingesetzt werden kann, muss es auf der Grundlage von in der Natur gemessenen Daten kalibriert werden. Für die dann folgenden Untersuchungen bleiben die Kalibrierungseinstellungen unverändert.

5.1 Mathematisches Verfahren UnTRIM

Für diese Untersuchung wird das bei der BAW-DH entwickelte HN-Modell der Tideems eingesetzt. Die Auswahl eines geeigneten mathematischen Verfahrens, die Vollständigkeit und Genauigkeit der für den Modellbetrieb benötigten Datensätze (z.B. Rand- und Anfangswerte), die Festlegung eines für die Aufgabenstellung angemessenen Modellgebietes sowie die Wahl geeigneter Parameter für die Modellierung bestimmen die Qualität der erzielbaren Modellergebnisse und beeinflussen damit die Prognosefähigkeit des Verfahrens.

Das HN-Modell der Tideems basiert auf dem mathematischen Verfahren *UnTRIM* (s.a. Casulli and Walters, 2000) in der Version 2007. UnTRIM ist ein dreidimensionales, semi-implizites Finite-Differenzen- / Finite-Volumen-Verfahren auf unstrukturierten orthogonalen Gittern zur Lösung der reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichung. Dabei werden die folgenden Prozesse zur Bestimmung von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt:

- lokale Beschleunigung (Massenträgheit) und advective Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen
- Oberwasserzufluss
- Barotroper und barokliner Druckgradient

- hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop)
- turbulente vertikale Viskosität unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung: k-e-Modell (Rodi, 1987)
- Bodenreibung (zeit- und ortsvariabel)
- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken

Der massenkonservierende Transport von Tracern (Salzgehalt, Schwebstoffkonzentration, Temperatur) wird unter Berücksichtigung der folgenden Prozesse berechnet:

- lokale Veränderung
- advektiver Transport durch die Strömung
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop)
- turbulente vertikale Diffusivität unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung: k-e-Modell (Rodi, 1987)
- Für Schwebstoffe: Sinkgeschwindigkeit, Deposition und Erosion
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und der Gewässersohle
- Quellen und Senken
- Senken mit unmittelbarer Wiedereinleitung an einem anderen Ort mit der Möglichkeit zur Abwandlung z.B. der Einleitungstemperatur sowie des Einleitungssalzgehalts gegenüber den entsprechenden Entnahmewerten

Im Ergebnis werden vom HN-Modell UnTRIM in Kopplung mit dem morphodynamischen Modell SediMorph die hydrodynamischen Zustandsgrößen (Wasserstand, Strömungsvektor, Salzgehalt, Temperatur und Schwebstoffgehalt) in diskreten Tiefen für einen ausgewählten Zeitraum ermittelt.

5.2 Gitternetz des Tideems-Modells

Das Gebiet des ortsspezifischen HN-Modells ist so gewählt worden, dass die maßgebenden physikalischen Prozesse (hier Tidedynamik, Salz-, Wärme- und Schwebstofftransport bei mittleren Tiden) hinsichtlich der Auswirkungen des geplanten Ausbaus simuliert werden können. Das Modellgebiet umfasst einen Bereich zwischen den Gauß-Krüger-Koordinaten 2525739 / 5971147 im Nordwesten (Deutsche Bucht nordwestlich von Borkum), Hochwert 5878283 im Süden (Wehr Herbrum) und Rechtswert 2629637 im Osten (Leda-Jümme-System). Der seeseitige Rand liegt nördlich der Inselkette Simonszand – Borkum – Juist – Norderney, der Oberwasserzufluss wird für die Ems am Wehr Herbrum und für Leda und Jümme eingesteuert.

Das Modellgebiet ist mit einem unregelmäßigen Gitternetz aus Drei- und Viereckselementen überzogen. Dieses unregelmäßige Netz erlaubt eine an die Topographiegradienten angepasste Auflösung und ermöglicht so einen wirtschaftlichen Umgang mit Speicherplatz und Rechenzeit. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt in der horizontalen etwas mehr als $221 \cdot 10^3$, was bei der vertikalen Auflösung von 1 m zu über 1,6 Million Elementen führt. Die Kantenlängen des Netzes variieren von ca. 10 m im Bereich der Fahrrinne des Dortmund-Ems-Kanals bis zu 1 km am seeseitigen Modellrand. Die häufigste Kantenlänge der Elemente beträgt ca. 30 m. Die Fläche der Elemente variiert dabei von 33 m^2 bis zu $0,5 \text{ km}^2$, wobei die häufigste Elementfläche ca. 200 m^2 beträgt.

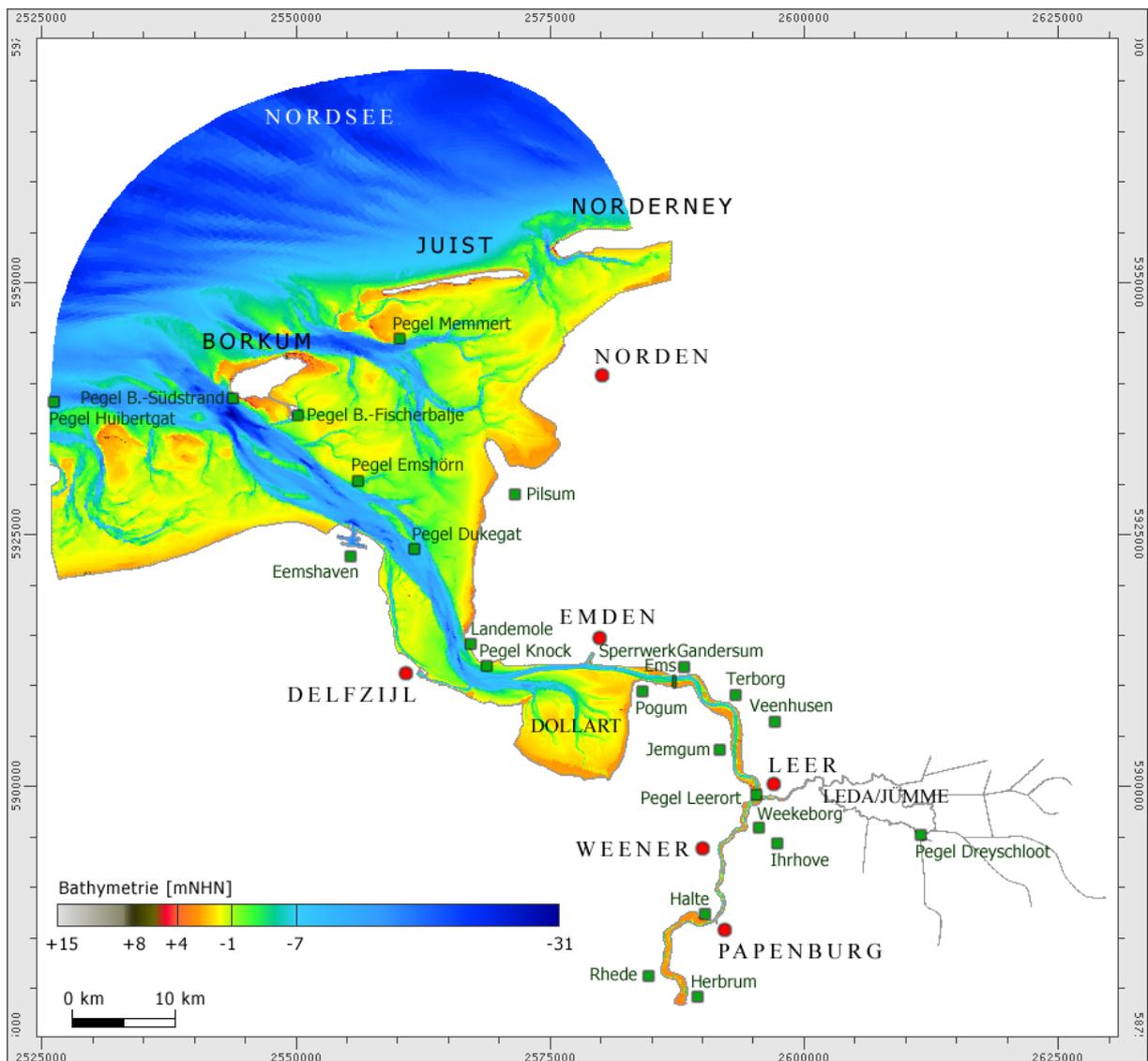


Bild 1: Das Modellgebiet des HN-Modells der Tideems von der Nordsee bis zum Wehr Herbrum inklusive der Nebenflüsse Leda und Jümme und der tidebeeinflussten Tiefs stromauf von Leda und Jümme. Der Farbverlauf gibt die Tiefenverteilung des Modells auf der Basis des DGMW 2010 wieder.

Die Bathymetrie des Gitternetzes basiert auf dem digitalen Geländemodell 2010 der Ems, das von den Firmen inphoris und smile in Zusammenarbeit mit der BfG und dem WSA Emden erstellt worden ist (ARGE Unter-/Außenems, 2012).

5.3 Modellsteuerung

Ästuarmodelle sind immer nur Ausschnittsmodelle, an deren offenen Rändern zeitabhängige Randwerte für den Wasserstand oder die Strömungsgeschwindigkeit und für die transportierten Substanzen vorgegeben werden müssen. In der Regel wird ein Ästuarmodell seeseitig durch Vorgabe der Wasserspiegelauslenkung und an der oberstromseitigen Grenze durch die Vorgabe eines Zuflusses gesteuert, der über den aktuellen Wasserstand und die lokale Tiefe in Strömungsgeschwindigkeiten umgerechnet wird. An diesen Rändern müssen auch Massenkonzentrationen für Salz, Temperatur und Schwebstoffe vorgegeben werden.

Für das gesamte Modellgebiet müssen auch Anfangsbedingungen vorgegeben werden. Wasserspiegelauslenkungen und Strömungsgeschwindigkeiten können in der Regel mit „0“ initialisiert werden, da diese Größen im ganzen Modellgebiet binnen einer Tide von den Randwerten geprägt werden und nicht mehr vom Anfangszustand. Für die Verteilung des Salzes wird eine an Messungen orientierte räumliche Verteilung vorgegeben, da der Transport von Salz wesentlich „träger“ ist, und somit ein naturnaher Anfangszustand von großer praktischer Bedeutung für die Laufzeit des Modells ist.

5.3.1 Seerandsteuerung

Entlang des Seerandes müssen die Wasserstandswerte für alle Elemente und für den gesamten Simulationszeitraum vorgegeben werden. Dies erfolgt für dieses Modell mit Hilfe der Messung am Pegel Huibertgat, denn der Modellrand ist so gewählt, dass der Standort des Pegels Huibertgat auf dem Seerand liegt.

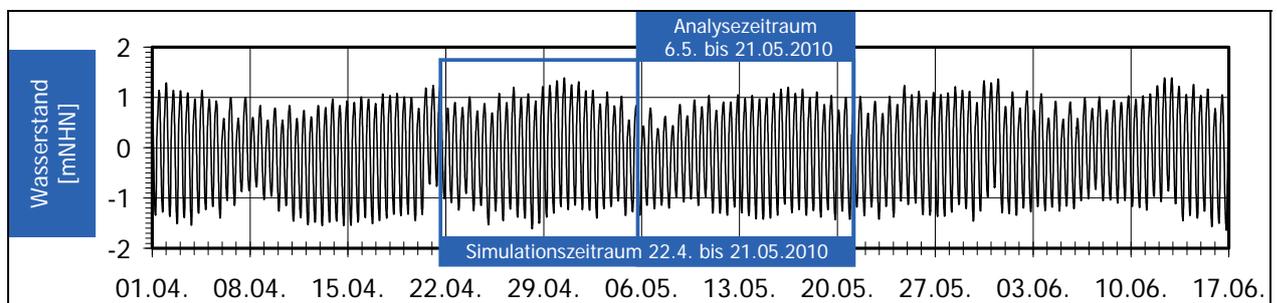


Bild 2: Gemessene Wasserstandsganglinie des Pegels Huibertgat für den Zeitraum 1. April bis 17. Juni 2010. Hervorgehoben sind sowohl der gesamte Simulationszeitraum von 2 Spring-Nipp-Zyklen (22. April bis 21. Mai 2010) als auch der zweite Spring-Nipp-Zyklus (6. bis 21. Mai 2010), der zugleich auch der Zeitraum der Tidekennwertanalyse ist.

Der Simulationszeitraum setzt sich aus insgesamt 2 Spring-Nipp-Zyklen zusammen. Der erste Spring-Nipp-Zyklus dient insbesondere dem Einschwingen des Salzgehaltes. Nur der zweite Spring-Nipp-Zyklus wird auf Tidekennwerte und auf ausbaubedingte Änderungen analysiert. Der Simulationszeitraum ist so gewählt, dass der mittlere Tidehub der 28 Tiden des Analysezeitraums am Pegel Huibertgat mit dem mittleren Tidehub für 2010 übereinstimmt. Für die 28 Tiden des Analysezeitraums vom 6. bis 21. Mai 2010 beträgt der mittlere Tidehub 2,16 m. Das WSA Emden nennt den gleichen Wert als Mittelwert für 2010.

5.3.2 Oberwasserzufluss

Der Oberwasserzufluss der Ems wird am Wehr Herbrum eingesteuert. Für die Kalibrierung werden die Tagesmittelwerte der Messung Versen (gesamt) verwendet und mit 1,1 multipliziert, um seitliche Zuflüsse zwischen Versen und Herbrum zu berücksichtigen.

Der Oberwasserzufluss von Leda und Jümme ist vom NLWKN aus der Differenz der Flut- und Ebbstromvolumen am Pegel Leer/ Leda ermittelt worden und wird zu gleichen Teilen an zwei Stellen im oberstromigen Abschnitt des Leda-Jümme-Systems im Modell eingesteuert.

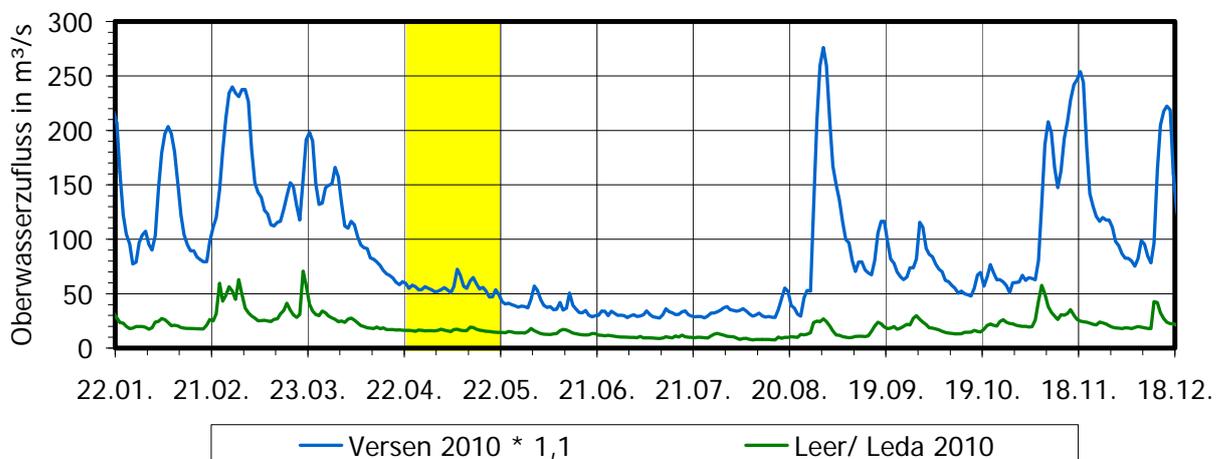


Bild 3: Oberwasserzufluss für den Pegel Versen (gesamt) mit 1,1 multipliziert (blau) und für den Pegel Leer/ Leda (grün). Der Simulationszeitraum ist gelb hervorgehoben.

5.3.3 Anfangsverteilung und Steuerung des Salzgehalts

Der Salzgehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort ist auch von langsam wirkenden Prozessen abhängig. So steigt z.B. der Salzgehalt im Ästuar nicht sofort mit abnehmendem Oberwasserzufluss an, sondern es wird residuell Tide für Tide Salz nach stromauf transportiert, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen reduziertem barotropen Druckgradienten und der baroklinen Zirkulation einstellt. Aus diesem Grund wird die Salzan-

fangsverteilung für das HN-Modell aus vorhandenen Messungen interpoliert vorgegeben. Zusätzlich erhält das Modell einen Spring-Nipp-Zyklus Zeit zum Einschwingen des Salzgehalts auf den aktuell vorherrschenden Oberwasserzufluss.

Für die Kalibrierung des Modells sind die folgenden Werte als Stützstellen für die Interpolation der Anfangsverteilung des Salzgehalts verwendet worden:

Pegel	Salzgehalt
Knock	18,5 PSU
Emden/ Westmole	13,5 PSU
Gandersum	7,9 PSU
Terborg	4,0 PSU
Leerort	0,9 PSU
Weener	0,45 PSU
Papenburg	0,4 PSU
Herbrum	0,4 PSU

Tabelle 2: Stützwerte für die Interpolation des Anfangssalzgehalts für den 22. April 2010 für die Kalibrierung des HN-Modells. Die gewählten Werte entsprechen in etwa dem mittleren Salzgehalt für den 21. und 22. April 2010.

Am seeseitigen Rand wird ein konstanter Salzgehalt von 32 PSU eingesteuert, der Salzgehalt des Oberwasserzuflusses beträgt im Rahmen der Kalibrierung konstant 0,4 PSU.

5.3.4 Anfangsverteilung und Steuerung der Wassertemperatur

Die Anfangsverteilung beruht auf Messungen der Wassertemperatur an vorhandenen Pegelstationen und wird mit Hilfe dieser Stützstellen auf das gesamte Modellgebiet interpoliert. Die Randwerte der Temperatur müssen nicht nur für den seeseitigen Modellrand und den Oberwasserzufluss vorgegeben werden. Zusätzlich sind auch die Wärmeflüsse erstens zwischen dem Wasserkörper und der Atmosphäre darüber und zweitens zwischen dem Wasserkörper und dem Boden darunter vorzugeben. Dazu wird entweder ein konstanter Wärmefluss vorgegeben (z.B. 0,063 W/m² für den Wärmefluss vom Boden in den Wasserkörper) oder indirekt über die ggf. zeitlich variable Temperatur der Atmosphäre. Der Wärmefluss ergibt sich dann aus der Differenz der Wasser- und Lufttemperatur und kann sowohl Wärme in den Wasserkörper transportieren, wenn die Lufttemperatur höher ist als die Wassertemperatur, als auch Wärme aus dem Wasserkörper in die Atmosphäre abführen, wenn die Wassertemperatur höher ist als die Lufttemperatur.

5.3.5 Anfangsverteilung und Steuerung der Sedimentfraktionen

Bei Sedimenttransportuntersuchungen wird das modellierte Sedimentverhalten entscheidend durch die Anfangsverteilung des Sedimentinventars am Boden bestimmt. Gegenwärtig wird das Sedimentinventar der Außenems und des Dollart auf der Grundlage von 1816 Sedimentproben beschrieben, die vom RIKZ für dieses Gebiet analysiert wurden. Das Sedimentinventar der Unterems wird auf der Grundlage von Bodenproben des WSA Emden entlang der Fahrrinne der Unter- und Außenems von Herbrum bis Ems-Kilometer 55 beschrieben. Aus diesen Daten wurde für die Modellrechnungen dieser Untersuchung ein Datensatz konstruiert, der das Sedimentinventar flächenhaft mittels 2 Fraktionen für die Geschiebefracht (Grobsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 500 μm und Feinsand mit einem mittleren Korndurchmesser von 125 μm) und einer Fraktion für den Transport in Suspension (schluffiges Material mit einem mittleren Korndurchmesser von 20 μm , Sinkgeschwindigkeit ca. 0.5 mm/s) beschreibt (s.a. Tabelle 3). Die Sedimentdichte beträgt einheitlich 2650 kg/m^3 , die Mächtigkeit des erodierbaren Bodens beträgt einheitlich 25 cm.

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

Tabelle 3: Anteil der verwendeten Sedimentfraktionen am Bodenvorrat zu Beginn des Simulationszeitraums

Am seeseitigen Rand wird ein konstanter Schwebstoffgehalt von 0,01 kg/m^3 für die Fraktion Schluff eingesteuert, der Oberwasserzufluss ist frei von Schwebstoffen der Fraktion Schluff.

5.4 Kalibrierung und Validierung des HN-Modells

Kalibrierung bezeichnet die Vorgehensweise mit der beim Anpassen verschiedener Parameter eines numerischen Modells ein möglichst naturähnliches Modellverhalten erzielt wird. Das ortsspezifische numerische Modell wird dabei noch bewusst verändert.

„Validierung“ wird der Nachweis genannt, dass die Ergebnisse eines numerischen Modells für einen gewissen Anwendungsbereich innerhalb eines bestimmten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung liegen. Das ortsspezifische numerische Modell wird dabei nicht verändert.

Der Nachweis der Naturähnlichkeit muss prinzipiell für alle vom Modell simulierten Größen wie Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte, Temperaturen und Schwebstoffkonzentrationen geführt werden. Für das Gebiet des Ems-Dollart-Ästuars stehen dazu die an den gewässerkundlichen Stationen gemessenen Daten des WSA Emden, des

NLWKN und von niederländischer Seite (Rijkswaterstaat) zur Verfügung. Die an diesen Positionen gemessenen und berechneten Wasserstände und Salzgehalte werden in diesem Kapitel stichprobenartig dargestellt.

5.4.1 Wasserstand

Es werden exemplarisch für den Pegelstandort Terborg die gemessenen und die vom HN-Modell berechneten Wasserspiegelauslenkungen dargestellt (Bild 4). Sowohl im Tidehub als auch in der Phasenlage liefert das Modell ein überzeugendes Ergebnis.

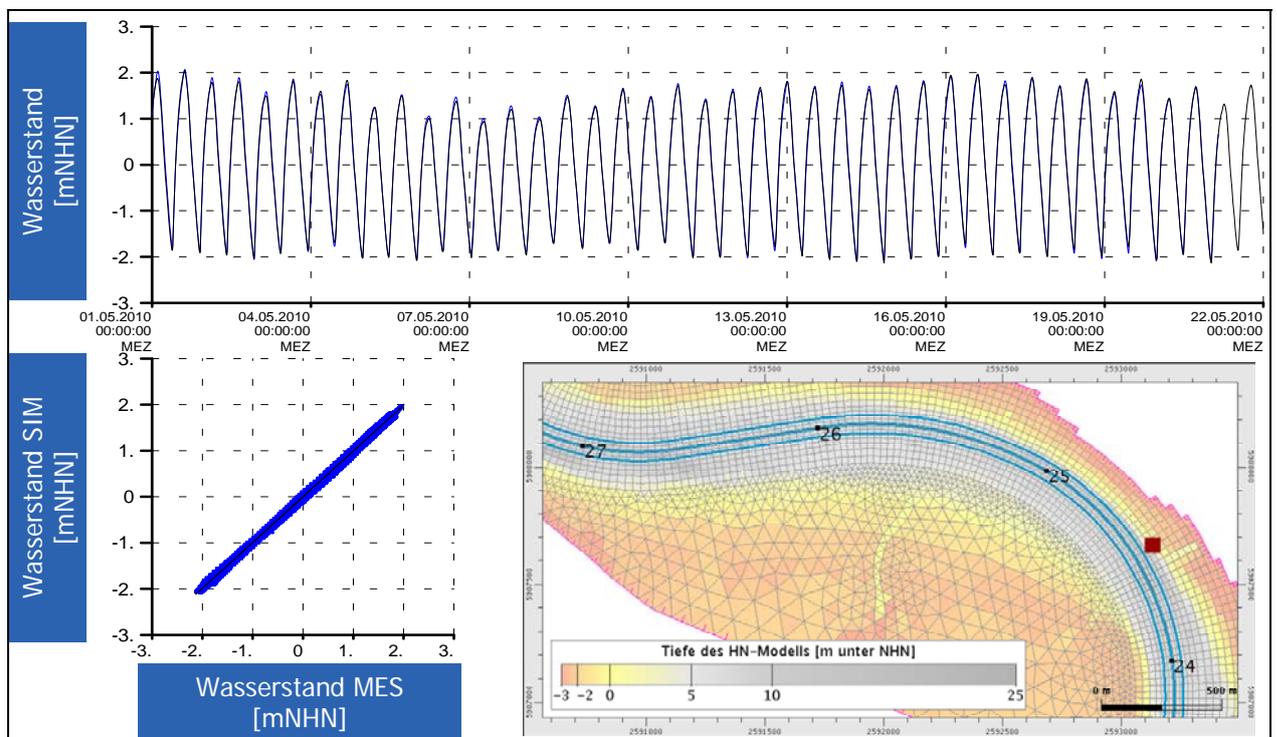


Bild 4: Wasserstandsvergleich für den Pegelstandort Terborg (roter Punkt unten rechts). Oben die gemessene Zeitreihe (schwarz) im Vergleich mit der vom HN-Modell berechneten Zeitreihe (blau). Unten links das Streuungs-Diagramm für alle 5-Minuten-Werte beider Zeitreihen vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr (entspricht dem Analysezeitraum zur Berechnung der Tidekennwerte). Die Koeffizienten der Regressionsgerade (schwarz) für das Streuungs-Diagramm betragen für Terborg: $SIM = 0,9935 \cdot MES - 0,0026 \text{ mNHN}$.

Dieser Vergleich kann nun für alle Pegelstandorte durchgeführt werden. Einen kompakteren Überblick erhält man, wenn anstatt der Zeitreihen Tidekennwerte miteinander verglichen werden (Tabelle 4).

	Thw (cmNHN)			Tnw (cmNHN)			Thb (cm)		
	Mess.	Modell	Diff.	Mess.	Modell	Diff.	Mess.	Modell	Diff.
Huibertgat	091	092	+1	-125	-125	±0	216	216	±0
Borkum-Südstr.	091	101	+10	-136	-133	+3	227	233	+6
Borkum-Fischblj.	103	108	+5	-139	-138	+1	241	246	+5
Emshörn	115	113	-2	-147	-149	-2	261	262	+1
Knock	131	130	-1	-173	-180	-7	304	310	+6
Emden	140	144	+4	-194	-191	+3	334	335	+1
Pogum	145	149	+4	-198	-191	+7	342	341	-1
Terborg	160	162	+2	-193	-193	±0	353	355	+2
Leerort	171	171	±0	-195	-191	+4	366	362	-4
Weener	177	177	±0	-198	-194	+4	375	371	-4
Papenburg	183	180	-3	-195	-199	-4	378	379	+1
Rhede	186	185	-1	-182	-170	+12	367	355	-12

Tabelle 4: Vergleich Messung vs HN-Modell des mittleren Tidehochwassers (Thw), des mittleren Tideniedrigwassers (Tnw) und des mittleren Tidehubs (Thb) für verschiedene Pegelstandorte entlang der Ems für den Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr. Für den Pegelstandort Dukegat liegen keine vollständigen Messdaten für den Analysezeitraum vor und für den Pegelstandort Herbrum ist die Messung nahe Tnw durch Verschlickung teilweise fehlerhaft.

Die Übersicht zeigt, dass mit Ausnahme des mittleren Tidehochwassers für den Pegelstandort Borkum-Südstrand weder in der Außenems noch in der Unterems Abweichungen von ≥ 1 dm auftreten. Erst im Dortmund-Ems-Kanal nehmen die Abweichungen deutlich zu.

Diese und weitere Kennwerte können grafisch dargestellt werden. Bild 5 zeigt den Vergleich Messung vs HN-Modell für das Tidehochwasser, Bild 6 für das Tideniedrigwasser und Bild 7 für die Laufzeit des Tidehochwassers. Dabei zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Modellergebnissen. So wird vom Modell auch qualitativ richtig wiedergegeben, dass das Thw-Signal auf seinem Weg von der Nordsee in die Ems in Papenburg früher ankommt als in Leerort. Grundlage für die Erklärung dieses Phänomen ist, dass es sich bei der Tidewelle nicht um eine mono-frequente (Sinus-)Welle handelt, sondern dass das zu beobachtende Tidesignal aus verschiedenen Anteilen mit unterschiedlichen Frequenzen, Amplituden und Phasen (Partialtiden) zusammengesetzt ist. Insbesondere die Überlagerung der in der Deutschen Bucht dominanten Partialtide M2 mit ihren Obertiden M4 und M6 spielt hierbei eine wichtige Rolle.

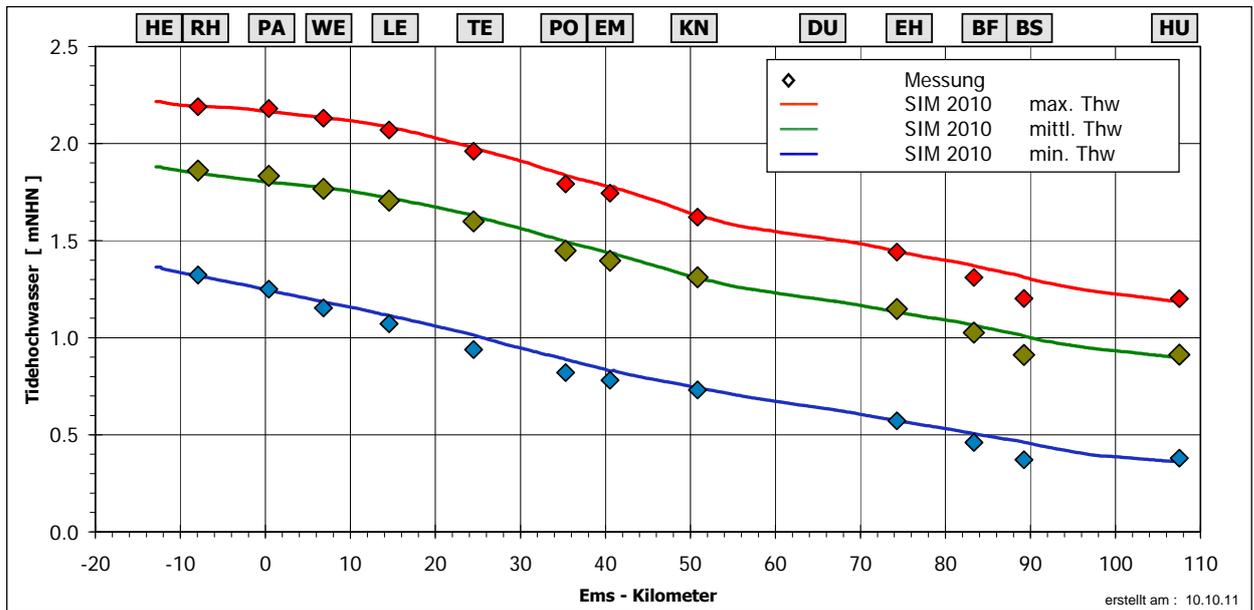


Bild 5: Vergleich Messung vs HN-Modell des Tidehochwassers (Thw): Dargestellt sind das minimale Thw (blau), das mittlere Thw (grün) und das maximale Thw (rot). Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

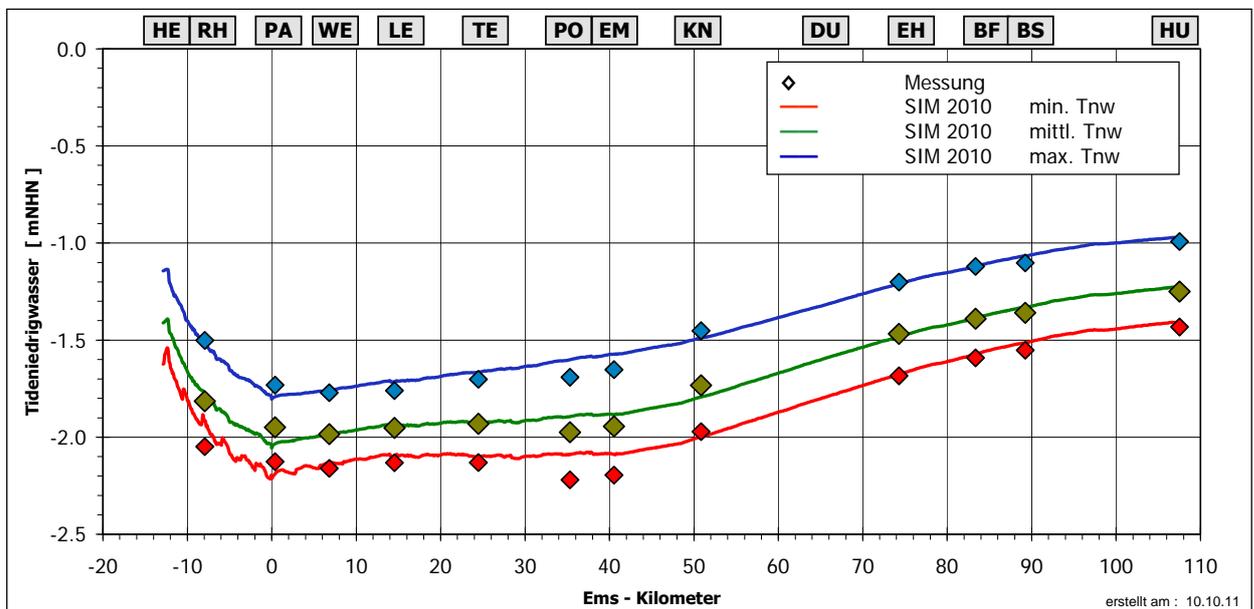


Bild 6: Vergleich Messung vs HN-Modell des Tideniedrigwassers (Tnw): Dargestellt sind das minimale Tnw (rot), das mittlere Tnw (grün) und das maximale Tnw (blau). Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

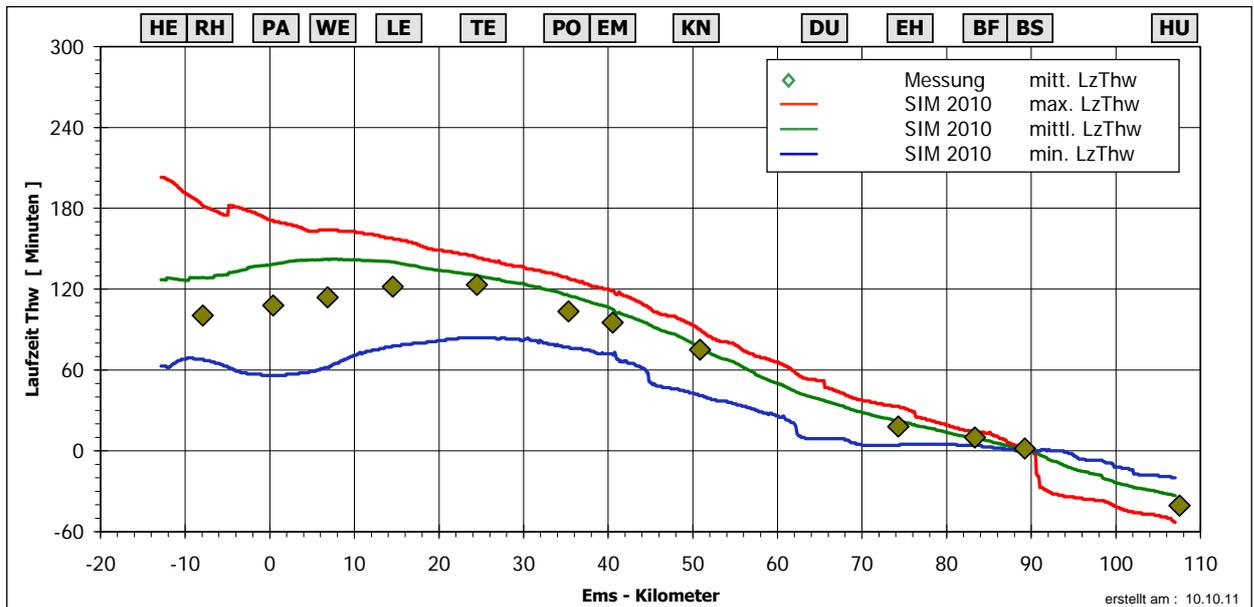


Bild 7: Vergleich Messung vs HN-Modell der Laufzeit des Tidehochwassers (LzThw), bezogen auf einen Referenzpunkt bei Ems-Kilometer 90: Dargestellt sind die minimale LzThw (blau), die mittlere LzThw (grün) und die maximale LzThw (rot). Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

Die Art der Überlagerung der in der Deutschen Bucht dominanten Partialtide M2 mit ihren Obertiden M4 und M6 führt zu einer Asymmetrie der Tidekurve. Dabei ist neben dem Verhältnis der Amplituden M4 zu M2 und M6 zu M2 insbesondere auch die Phasenverschiebung zwischen M4 und M2, bzw. zwischen M6 und M2 wichtig. Bild 8 zeigt in einer Prinzipskizze vier Fälle von Überlagerungen einer M2- mit einer M4-Tide (Amplitudenverhältnis jeweils 0,2) für vier unterschiedliche Phasenverschiebungen (-90° , 0° , $+90^\circ$ und $+180^\circ$). Die Folgen für die Asymmetrie der Tidekurve sind wie folgt:

- $\varphi = -90^\circ$ Ebbedauer verkürzt, entsprechend Flutdauer verlängert
- $\varphi = 0^\circ$ Thw und Tnw angehoben; Thw spitz zulaufend und Plateau-Bildung um Tnw
- $\varphi = +90^\circ$ Flutdauer verkürzt, entsprechend Ebbedauer verlängert
- $\varphi = +180^\circ$ Thw und Tnw abgesenkt; Tnw spitz zulaufend und Plateau-Bildung um Thw

In der Natur kommen auch andere Phasenverschiebungen vor, entsprechend können sich Kombinationen aus zwei benachbarten oben beschriebenen Fällen bilden.

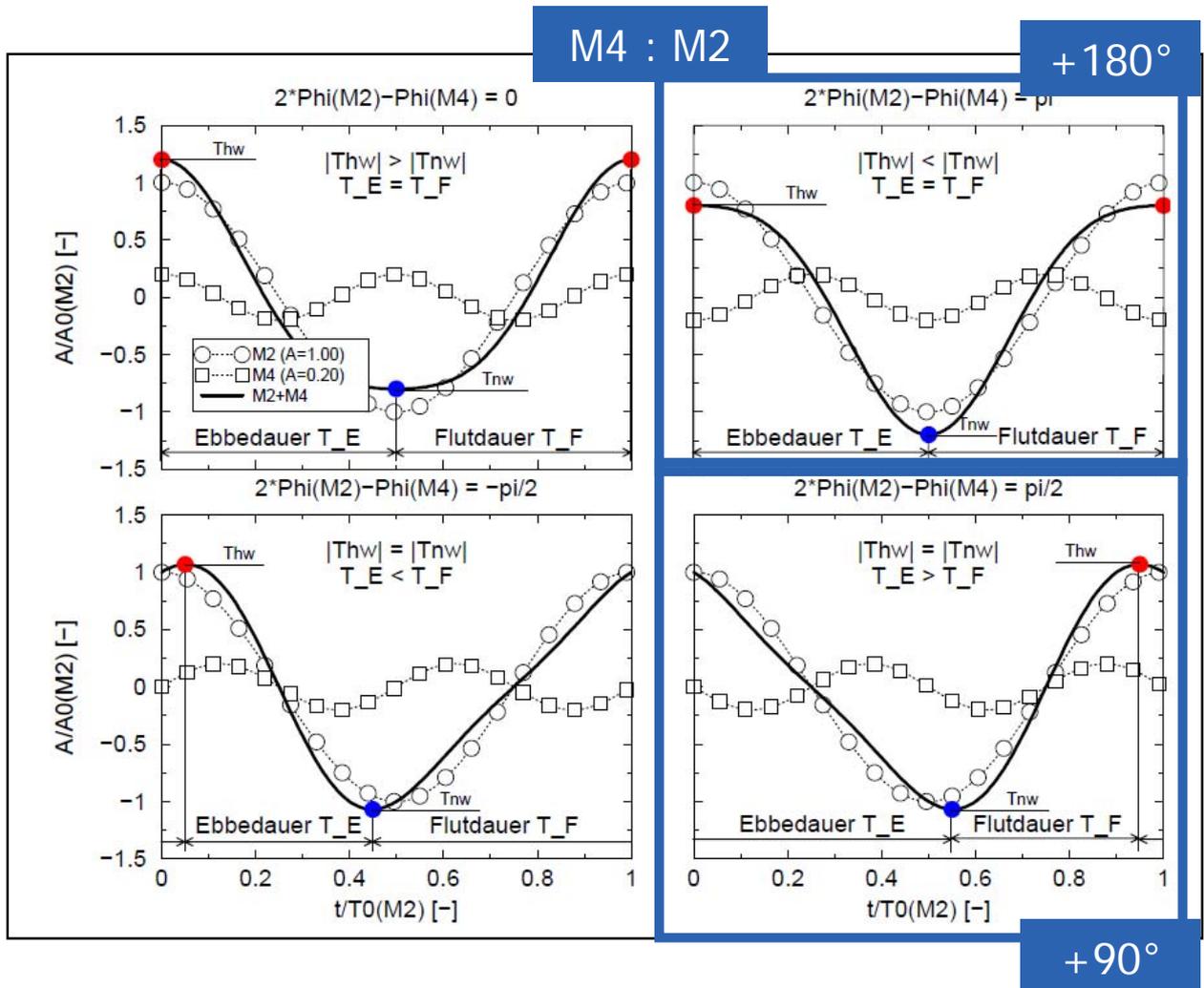


Bild 8: Überlagerung einer M2- mit einer M4-Tide mit einem Amplitudenverhältnis von 0,2 für vier unterschiedliche Phasenverschiebungen (Prinzipiskizze). Blau hervorgehoben die Fälle einer Phasenverschiebung von +180° (rechts oben; Tnw sinkt ab; Plateau-Bildung um Thw) und +90° (rechts unten; Flutdauer gegenüber Ebbedauer verkürzt).

Bild 9 zeigt in einer Prinzipiskizze vier Fälle von Überlagerungen einer M2- mit einer M6-Tide (Amplitudenverhältnis jeweils 0,1) für vier unterschiedliche Phasenverschiebungen (-90°, 0°, +90° und +180°). Die Folgen für die Asymmetrie der Tidekurve sind wie folgt:

- $\varphi = -90^\circ$ Thw und Tnw verspätet; +Buckel im Tidestieg, -Buckel im Tidefall
- $\varphi = 0^\circ$ Thw angehoben und Tnw abgesenkt; Thw und Tnw spitz zulaufend
- $\varphi = +90^\circ$ Thw und Tnw verfrüht; +Buckel im Tidefall, -Buckel im Tidestieg
- $\varphi = +180^\circ$ Thw abgesenkt und Tnw angehoben; Plateau-Bildung nahe Thw und Tnw

In der Natur kommen auch andere Phasenverschiebungen vor, entsprechend können sich Kombinationen aus zwei benachbarten oben beschriebenen Fällen bilden.

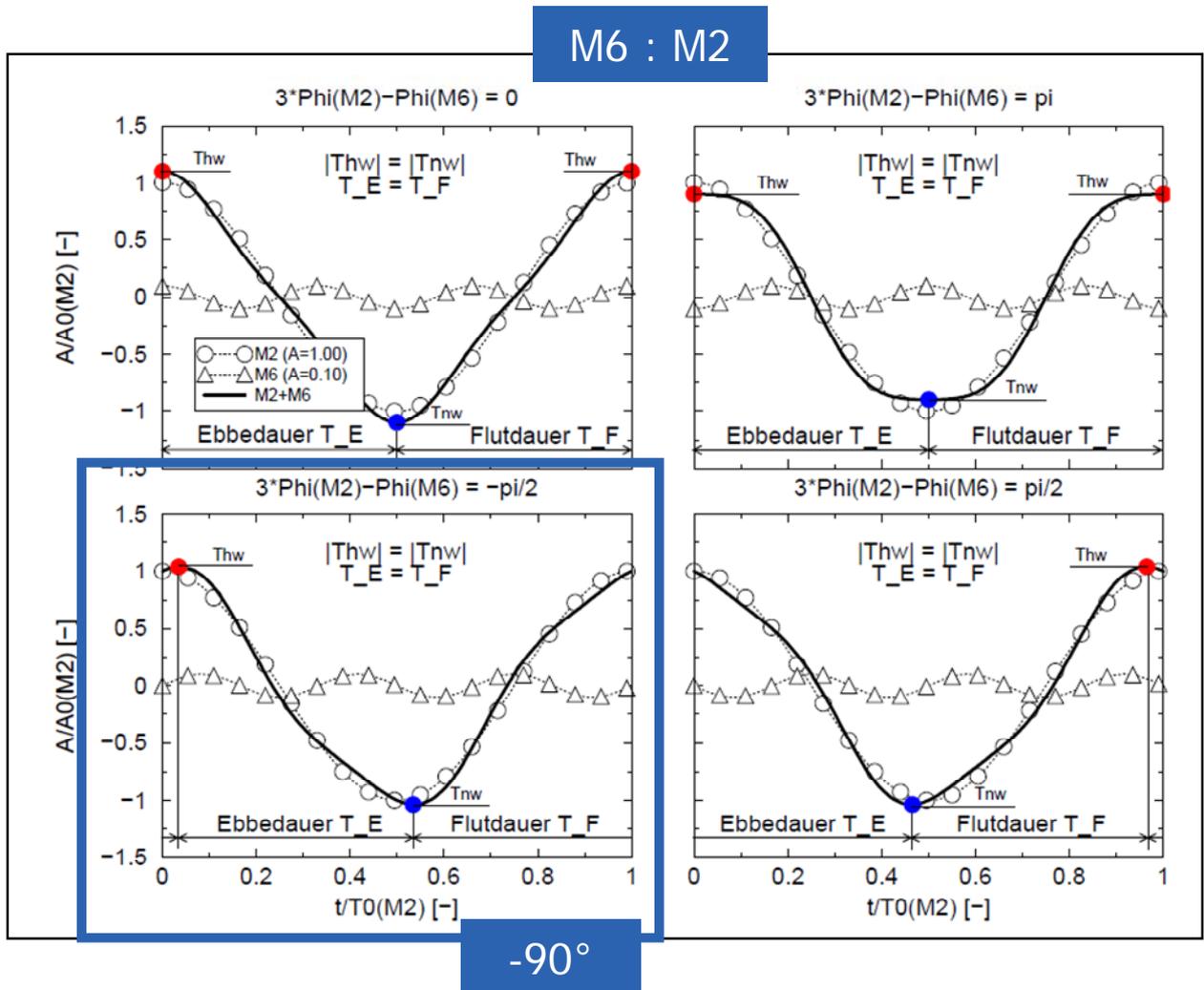


Bild 9: Überlagerung einer M2- mit einer M6-Tide mit einem Amplitudenverhältnis von 0,1 für vier unterschiedliche Phasenverschiebungen (Prinzipiskizze). Blau hervorgehoben der Fall einer Phasenverschiebung von -90° (links unten; +Buckel im Tidestieg; –Buckel im Tidefall).

Im Ems-Ästuar sind die in Bild 8 und Bild 9 blau markierten Fälle von Phasenverschiebungen relevant. Dies zeigen auch Bild 10 (Amplitudenverhältnis) und Bild 11 (Phasenverschiebung) für die Ems im Vergleich Messung vs HN-Modell. Bereits in der Außenems spielt die M4 eine Rolle, das Amplitudenverhältnis M4:M2 beträgt ca. 0,1. Im weiteren Verlauf bis Knock nimmt das Amplitudenverhältnis weiter zu, weil die Energie der M2-Partialtide durch nicht-lineare Prozesse wie z.B. unter dem Einfluss der Bodenreibung zu den höheren Partialtiden transferiert und letztlich abgebaut wird. Nimmt allerdings der Flussquerschnitt nach stromauf relativ schnell ab, wie z.B. von Knock in das Emden Fahrwasser, dann muss die Amplitude der M2 ansteigen und das Verhältnis sinkt wieder ab.

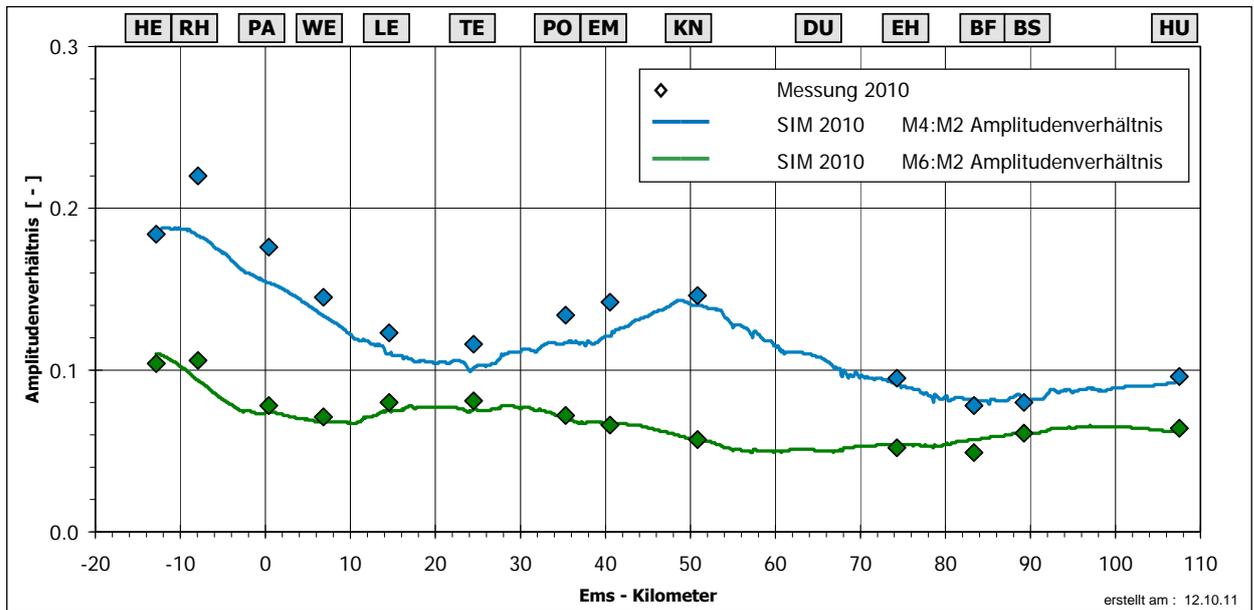


Bild 10: Vergleich Messung vs HN-Modell des Amplitudenverhältnisses M4:M2 (blau) und M6:M2 (grün). Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

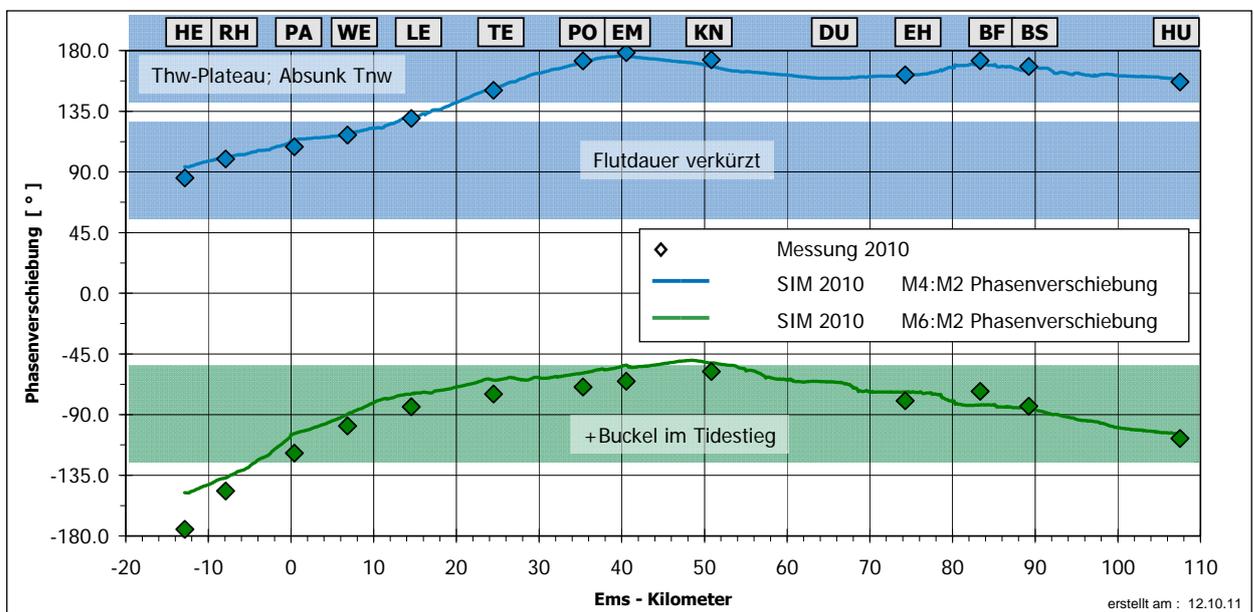


Bild 11: Vergleich Messung vs HN-Modell der Phasenverschiebung M4:M2 (blau) und M6:M2 (grün). Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

Die Situation an der Ems bezüglich der Tideasymmetrie lässt sich sehr gut mit Hilfe von Bild 11 erklären. Die Phasenverschiebungen M4:M2 und M6:M2 zeigen, dass bereits in der Außenems die Tidekurve verformt ist: Das T_{nw} ist gegenüber M2 abgesenkt und ein +Buckel im Tidedstieg ist zu beobachten. Beides zusammen führt zu einer Verstärkung der Flutstromgeschwindigkeiten in der ersten Flutstromhälfte, während sie in der zweiten Hälfte geschwächt werden. Nahe Thw bildet sich ein Plateau mit dadurch verlängerten Stauwasserzeiten. Alle Effekte führen dazu, dass bereits in der Außenems ein nach oberstrom gerichteter Netto-Transport von Schwebstoffen möglich ist. In der Unterems verschiebt sich die Phasenverschiebung M4:M2 hin zu einer Verkürzung der Flutdauer, was ebenfalls ungünstig mit Blick auf den Netto-Transport von Schwebstoffen ist, weil dadurch die Flutstromgeschwindigkeiten gegenüber den Ebbestromgeschwindigkeiten zunehmen.

Das HN-Modell ist in der Lage, die Veränderung des Amplitudenverhältnisses und der Phasenverschiebung im Ems-Ästuar naturnah nachzubilden.

5.4.2 Salzgehalt

Der Zeitreihen-Vergleich für drei ausgewählte Pegelstandorte in der Außenems (Bild 12), im Übergang vom Emders Fahrwasser in die Unterems (Bild 13) und in der Unterems (Bild 14) zeigt, dass der mittlere Salzgehalt, die Variation des Salzgehalts und die Eintrittszeiten des minimalen und maximalen Salzgehalts im HN-Modell mit den Messungen übereinstimmen. Zu berücksichtigen ist, dass die HN-Modellergebnisse für den Salzgehalt grundsätzlich deutlicher von den Messungen abweichen, als für den Wasserstand, weil der Salzgehalt im Vergleich zum Wasserstand eine höhere lokale Variabilität besitzt. Die HN-Modellergebnisse sind als räumlicher Mittelwert für eine Berechnungszelle (horizontal und vertikal) zu verstehen. Entsprechend werden kleinräumige Fluktuationen nicht vom HN-Modell dargestellt.

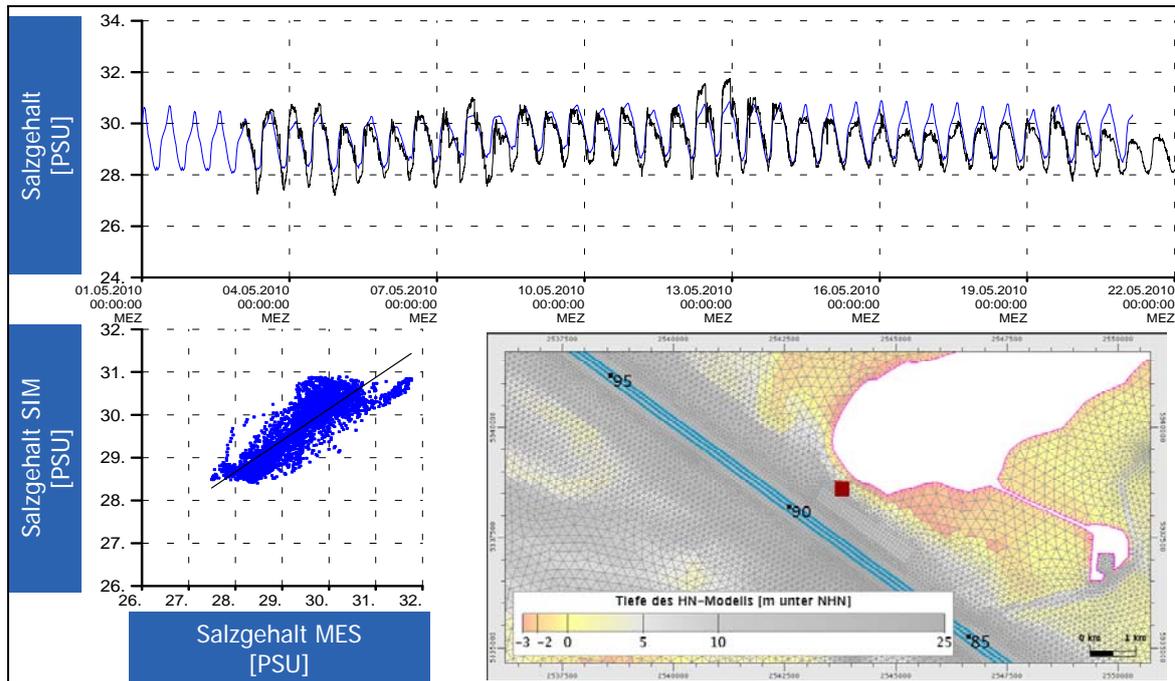


Bild 12: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Borkum-Südstrand (roter Punkt unten rechts). Oben die 1,6 m unter der Wasseroberfläche gemessene Zeitreihe (schwarz) im Vergleich mit der vom HN-Modell in der Tiefenschicht 2,5 bis 3,5 m unter NHH berechneten Zeitreihe (blau). Unten links das Streuungs-Diagramm für alle 5-Minuten-Werte beider Zeitreihen vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr (entspricht dem Analysezeitraum zur Berechnung der Tidekennwerte). Die Koeffizienten der Regressionsgerade (schwarz) für das Streuungs-Diagramm betragen für Borkum: $SIM = 0,7368 * MES + 8,0356 \text{ PSU}$

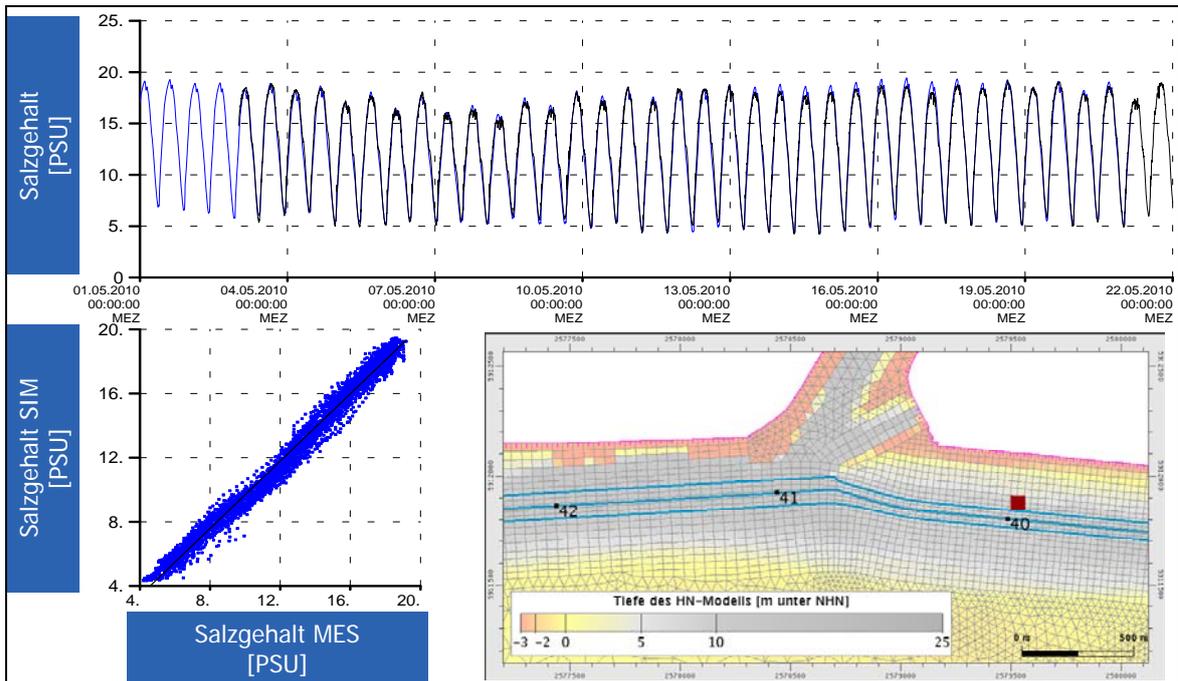


Bild 13: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Emden.
Messung (schwarz): 1,6 m unter der Wasseroberfläche
HN-Modell (blau): Tiefenschicht 2,5 bis 3,5 m unter NHN (blau).
Streuungs-Diagramm: Emden: $SIM = 1,0492 * MES - 0,8039$ PSU

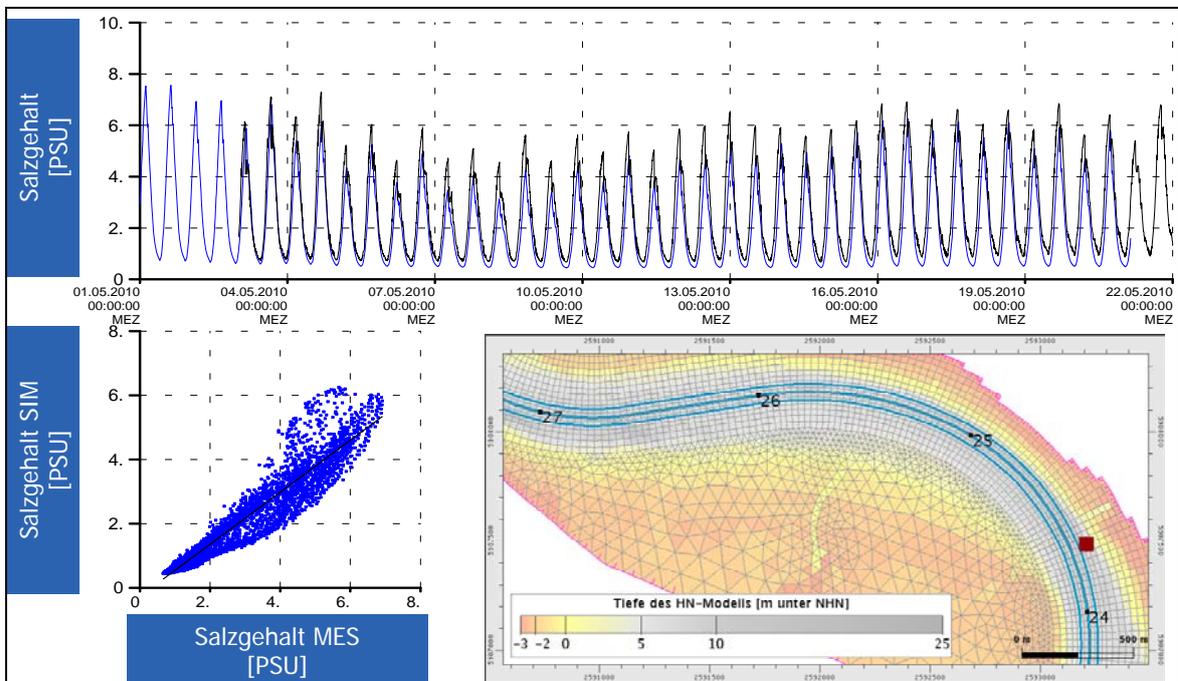
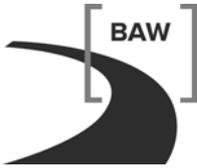


Bild 14: Salzgehaltsvergleich für den Pegelstandort Terborg.
Messung (schwarz): 0,9 m unter der Wasseroberfläche
HN-Modell (blau): Tiefenschicht 1,5 bis 2,5 m unter NHN
Streuungs-Diagramm: Terborg: $SIM = 0,8109 * MES - 0,2665$ PSU



Der Vergleich der Tidekennwerte des Salzgehalts (Bild 15) bestätigt grundsätzlich für alle Messpositionen den Eindruck, der aus dem Zeitreihenvergleich gewonnen wurde. Weitere Gründe für die Unterschiede zwischen den Tidekennwerten der Messungen und des HN-Modells sind:

- Das HN-Modell wird entlang des Seerandes mit einem Salzgehalt von konstant 32 PSU gesteuert. Weil für den Seerand keine Messungen des Salzgehalts vorliegen, kann dieser Wert zu hoch gewählt sein und so die zu hohen Salzgehalte für Borkum-Südstrand und Emshörn erklären.
- Die HN-Modellergebnisse sind in Fahrrinnenmitte abgegriffen, die Messungen erfolgen mit einem gewissen seitlichen Abstand zur Fahrrinne, um die Schifffahrt nicht zu stören.
- Die HN-Modellergebnisse sind tiefengemittelt dargestellt, die Messungen erfolgen in einer gegebenen Wassertiefe bezogen auf NHN oder bezogen auf die Wasseroberfläche.
- Für die Messpositionen Gatjebogen und Knock liegen die Messdaten nicht für den gesamten Analysezeitraum zur Verfügung, so dass für diese Zeitreihen weniger Tiden für die Bestimmung der Tidekennwerte des Salzgehalts analysiert worden sind.

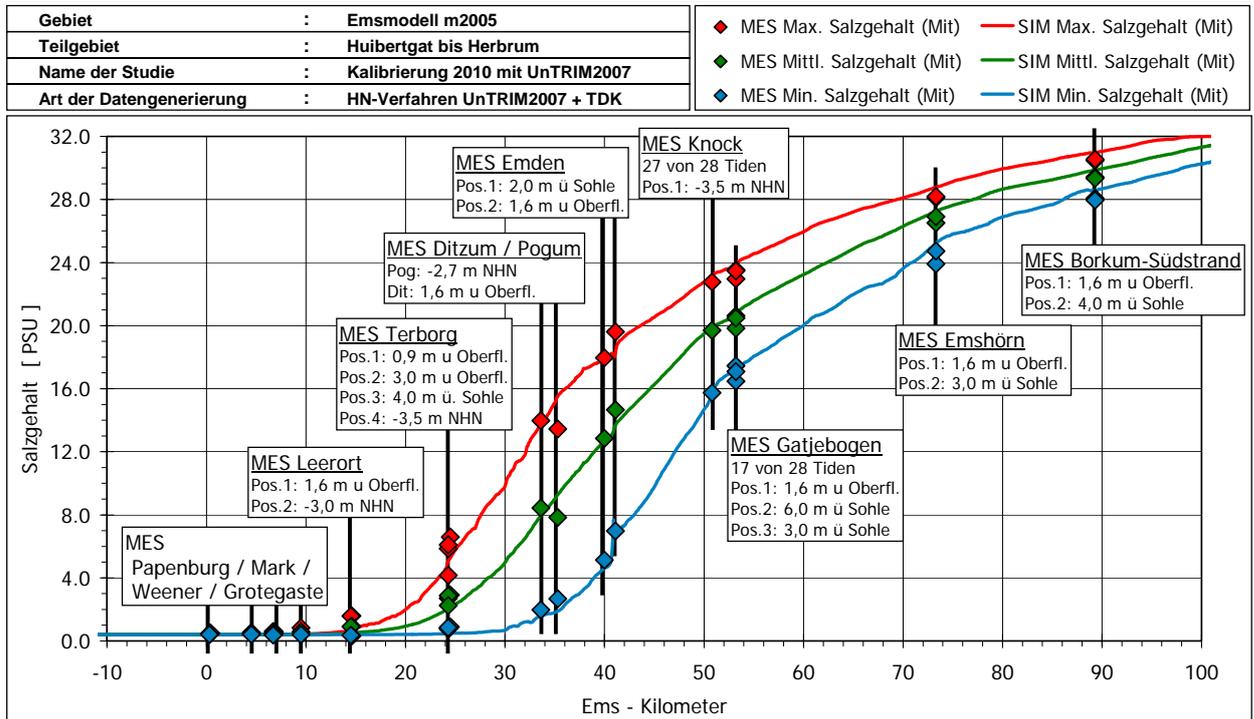


Bild 15: Vergleich Messung vs HN-Modell der Tidekennwerte des Salzgehalts
Rot: Maximaler Salzgehalt (gemittelt über 28 Tiden)
Grün: Mittlerer Salzgehalt (gemittelt über 28 Tiden)
Blau: Minimaler Salzgehalt (gemittelt über 28 Tiden)
 Die Markierungspunkte geben die jeweilige Größe für die Messung am Pegelstandort wieder und die Linien stellen die tiefengemittelten Modellergebnisse in Fahrrinnenmitte dar (Analysezeitraum vom 6. Mai 2010 08:00 Uhr bis zum 21. Mai 2010 03:00 Uhr).

5.4.3 Schwebstoffgehalt und –Transport

Für die Berücksichtigung des Schwebstoffgehalts im HN-Modell wird das HN-Modell mit dem mathematischen Verfahren SediMorph (BAW 2005) gekoppelt. Bei dem mathematischen Verfahren SediMorph handelt es sich um ein morphodynamisches Modell, welches die Prozesse im Gewässerboden simuliert. Hierzu werden die Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Schwebstofftransport der einzelnen Kornfraktionen bilanziert.

Die Kopplung zwischen den mathematischen Verfahren UnTRIM und SediMorph erfolgt über den Massenaustausch durch Erosion und Deposition. Der Schwebstoffgehalt ist deshalb im HN-Modell UnTRIM nicht nur abhängig vom advektiven Transport durch die Strömung, sondern auch von den folgenden Komponenten:

- Sedimentzusammensetzung am Boden
- Auf den Boden einwirkende Schubspannung, bedingt durch die Strömung des Wasserkörpers

- Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe
- Turbulenz in der Wassersäule

Die Sedimentzusammensetzung beeinflusst u.a., wie viel Material des Bodens von der Strömung erodiert werden kann. Grundlage des verwendeten Sedimentinventars sind die Messungen von über 1000 Bodenproben im Bereich Außenems und Dollart vom niederländischen Kataster sowie Bodenproben des WSA Emden für jeden Ems-Kilometer von Papenburg bis Ems-KM-55. Die Tabelle 5 gibt die gewählte Zusammensetzung wieder:

	Grobsand	Feinsand	Schluff
Mittlerer Korndurchmesser	500 µm	125 µm	20 µm
Dichte	2650 kg/m ³		
Sedimentanteil für Außenems und Dollart	6,0 %	73,9 %	20,1 %
Sedimentanteil für Unterems	0,0 %	21,0 %	79,0 %

Tabelle 5: Verwendete Bodenzusammensetzung für die Regionen Außenems und Dollart, sowie für die Unterems, Dortmund-Ems-Kanal und Leda-Jümme-System.

Die Schubspannung, die die Strömung des Wasserkörpers auf den Boden ausübt, beeinflusst den Erosionsfluss von Sedimenten vom Boden in den Wasserkörper und den bodennahen Transport von Sedimenten. Im HN-Modell werden die sandigen Fraktionen im Bedload-Transport nach van Rijn und die Schluff-Fraktion in Suspension mit dem Wasserkörper bewegt. Die Bodenschubspannung wird nach Nikuradse berechnet, die Bodenschubspannung ist proportional zum Quadrat der angreifenden Strömungsgeschwindigkeit. Wird die nach Shields berechnete kritische Bodenschubspannung überschritten, dann erfolgt die Berechnung des Erosionsflusses nach Partheniades (BAW, 2005).

Die Sinkgeschwindigkeit der Schwebstoffe (hier Schluff) ergibt sich nach Stokes als Konstantwert, abhängig nur vom Korndurchmesser und der Dichtedifferenz zwischen Schluff und Wasserkörper. Die Sinkgeschwindigkeit und die Konzentration des suspendierten Materials (hier Schluff) beeinflussen linear den Depositionsfluss. Die Validität der gewählten Parametrisierungen wird durch den nachfolgenden Vergleich von Modellergebnissen mit Ergebnissen aus Messkampagnen nachgewiesen.

Zunächst wird kurz das Sedimenttransportregime im Ems-Dollart-Ästuar beschrieben. Das Hauptinteresse liegt hier im Bereich der Außenems, da dort die wichtigsten Unterbringungsorte liegen. Es ist bekannt, dass sich der Sedimenttransport in der Außenems signifikant von den Verhältnissen im Bereich Gatjebogen/Emder Fahrwasser und in der Unterems unterscheidet. Die Schwebstoffkonzentrationen und die Trübung des Wasserkörpers sind in der Außenems wesentlich geringer als im Gatjebogen und weiter oberhalb, doch belastbare

Messungen der Schwebstoffkonzentrationen, die auch eine Bilanzierung des Transportes ermöglichen, gab es bislang nicht.

Daher wurden vom 28.06.-01.07.2011 von der BAW Schwebstoffmessungen durchgeführt, die auch den Bereich der Außenems abdeckten. Neben Ganztidenmessungen bei Gander-sum und südlich der Klappstelle 7 (Ems-KM 64) wurden auch Profilfahrten in der Fahr-rinne und über den Klappstellen 5, 7 und K2 durchgeführt. Die weiße Linie in Bild 16 zeigt die Längs- und Querprofile, die während dieser Messkampagne gefahren wurden.

Diese Messungen sind aus zwei Gründen von großer Bedeutung für die in diesem Gutachten zu beantwortenden Fragestellungen. Zum Einen kann die Validität des Modells und dessen Anwendbarkeit auf die Fragestellung durch den Vergleich mit den Ergebnissen dieser Mess-kampagne nachgewiesen werden. Zum Anderen ermöglicht die Ganztidenmessung südlich der Klappstelle 7 erstmals die Bilanzierung des Sedimentimports in das System und liefert damit einen zentralen Wert zur Erklärung des Systemverhaltens und zur Beurteilung der Möglichkeiten des Sedimentmanagements.

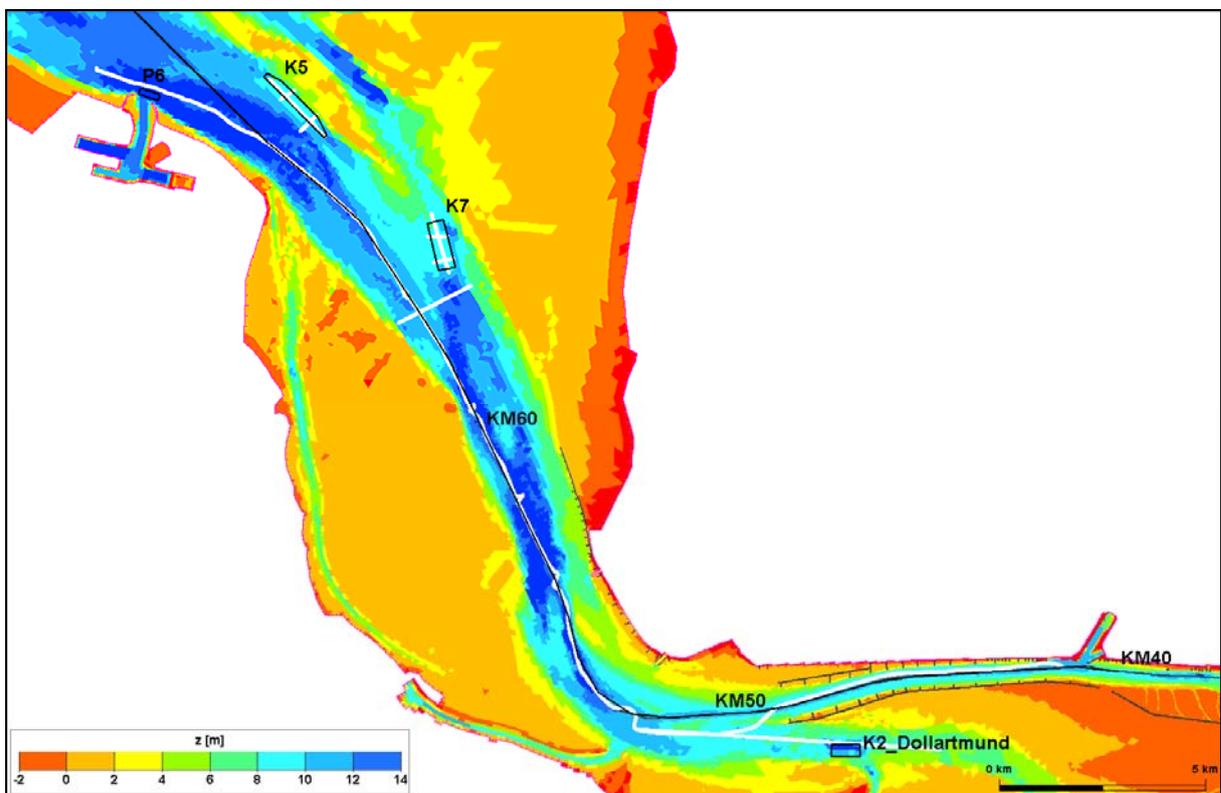


Bild 16: Ausschnitt der Topographie des Modells für den Ist-Zustand 2010. Zusätzlich sind die derzeit genehmigten Klappstellen eingezeichnet. Die weiße Linie zeigt die Längs- und Querprofile, die während der Schwebstoffmessungen 2011 gefahren wurden. Die schwarze Linie markiert die Mitte der Fahr-rinne.

Bild 17 zeigt die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen in der Fahrrinne zwischen Ems-KM 64-38. Bei dieser Messung fuhr das Schiff mit der Flutwelle stromauf, es ist also keine synoptische Darstellung. In der Außenems liegen die Werte im Mittel bei 0,2-0,3 g/l. Der sprunghafte Anstieg der Schwebstoffkonzentration mit dem Erreichen des Emders Fahrwassers auf Werte von über 0.8 g/l ist deutlich zu erkennen. Die Absolutwerte des tiefen- und tidengemittelten Schwebstoffgehalts für Zustand PS2 in Fahrrinnenmitte (Bild 49) zeigen insgesamt einen qualitativ und quantitativ ähnlichen Verlauf, ebenso wie die in Bild 21 flächenhaft dargestellten mittleren Schwebstoffkonzentrationen des Modells (Ist-Zustand 2010).

Von den Profilmfahrten im Bereich der Klappstellen sind in Bild 18 die entlang der Klappstelle 5 gemessenen Schwebstoffkonzentrationen dargestellt. Diese Messung fand zu Beginn der Flutphase statt. Die Konzentrationen liegen vertikal gemittelt bei ungefähr 0,1 g/l. Die sohl-nahen Konzentrationen sind aber durch den einsetzenden Erosionsprozess deutlich höher. Etwas höhere Werte, die im Mittel bei 0,25 g/l lagen, wurden im Bereich der Klappstelle 7 gemessen. Diese Messungen wurden bei voll entwickelter Flutströmung durchgeführt. Auch im Modell werden diese Schwebstoffkonzentrationen erreicht.

Querschnittsgemittelte Ergebnisse für Wasserspiegellage, Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit, mittlere Schwebstoffkonzentration, Transportrate und Transport der Ganztidenmessung stromauf der Klappstelle 7 (ca. bei Ems-KM 64) sind in Bild 19 zusammengestellt. Aus dem Produkt von Strömungsgeschwindigkeit und der Schwebstoffkonzentration wird die Transportrate berechnet, deren Integration über eine Tide den Nettotransport ergibt. Die Gesamtbilanz ergibt hier einen Nettotransport von 5728 t stromauf.

Ein Vergleich mit den Absolutwerten des querschnittsintegrierten advektiven Rest- Schwebstofftransportes¹ in Bild 49 (Variante PS2, BAW, 2012a) zeigt etwas höhere Werte des Modells in diesem Bereich. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Querschnittsintegration im Modell auch den (stark flutstromdominanten) Transport über die Wattgebiete erfasst. In Bild 22 ist der mittlere advektive Rest-Schwebstofftransport in der Außenems als flächenhafte Analysegröße dargestellt. Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz des Flutstrom- (Bild 23) und des Ebbstromtransportes (Bild 24). Es ist zu erkennen, dass im Modell ein nicht unerheblicher Anteil auf den großen Wattgebieten stromauf transportiert wird. Des Weiteren sind die in der Tidekennwertanalyse ermittelten maximalen Schwebstoffkonzentrationen im Modell etwas höher als in dieser Messung, so dass auch die Ebb- und Flutstromtransporte größer sind.

¹ Der advektive Rest-Schwebstofftransport ist der präzise Begriff für das Ergebnis der Tidekennwertanalyse. Synonym dazu wird hier auch der Begriff „Nettotransport“ verwendet.

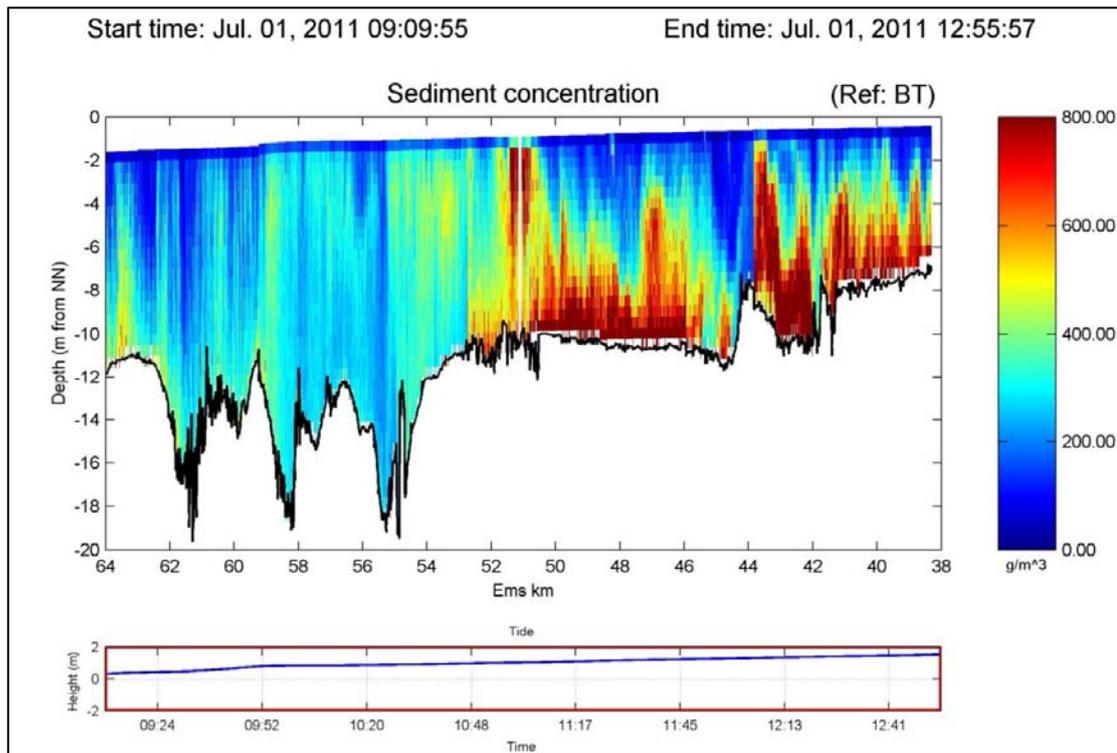


Bild 17: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen entlang der Fahrrinne zwischen Ems-Km 64-38. Der sprunghafte Anstieg der Schwebstoffkonzentration mit dem Erreichen des Emders Fahrwassers ist deutlich zu erkennen (Aqua Vision, 2011).

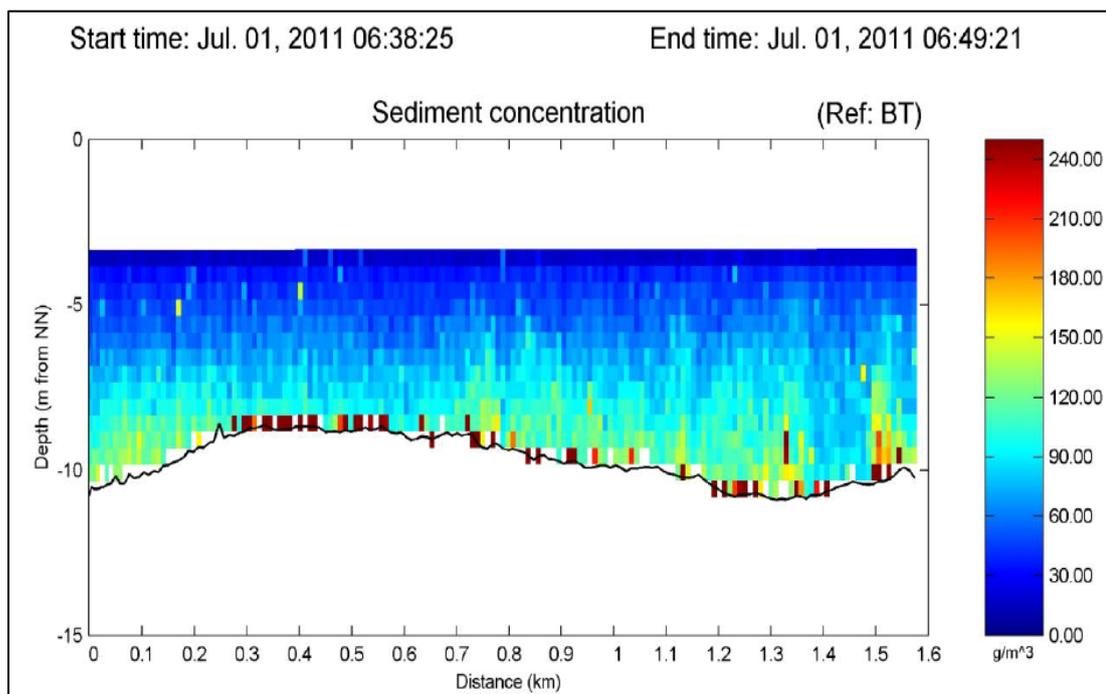


Bild 18: Gemessene Schwebstoffkonzentrationen im Bereich der Klappstelle 5 (Aqua Vision, 2011). Man beachte die geänderte Skalierung.

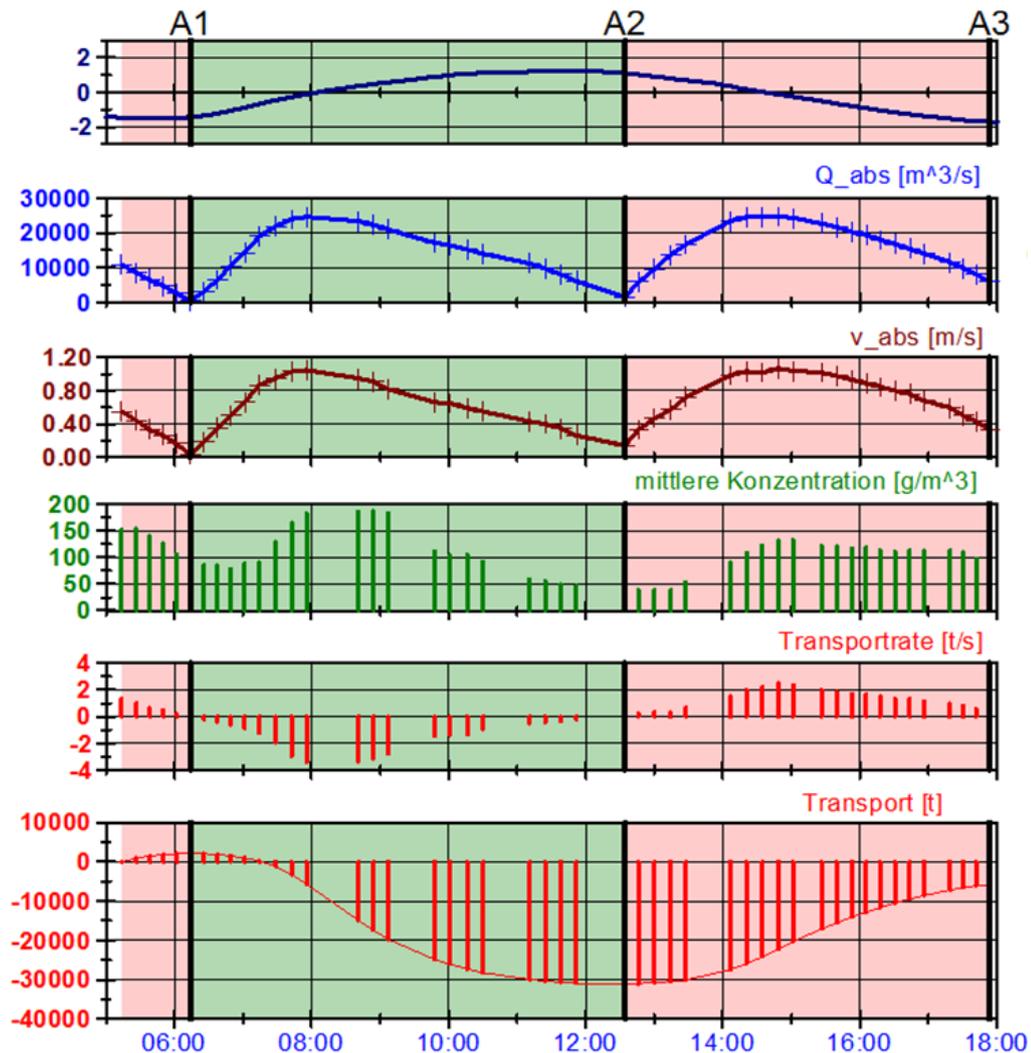


Bild 19: Querschnittsgemittelte Ergebnisse (Wasserspiegellage, Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit, mittlere Schwebstoffkonzentration, Transportrate, Transport) der Ganztidenmessung (30.06.2011) der Schwebstoffkonzentrationen stromauf der Klappstelle 7, ca. bei Ems-KM 64. Die Gesamtbilanz ergibt einen Nettotransport von 5728 t stromauf.

Die entsprechenden querschnittsgemittelten Ergebnisse der Ganztidenmessung der Schwebstoffkonzentrationen und des Schwebstofftransports bei Gandersum (ca. bei Ems-KM 34) sind in Bild 20 zusammengestellt. Auffällig sind die hohen Schwebstoffkonzentrationen zu Beginn der Flutphase. An diesem Querschnitt ergibt die Gesamtbilanz einen Nettotransport von 7581 t stromauf. Ein Vergleich mit den Absolutwerten des querschnittsintegrierten advektiven Rest-Schwebstofftransportes in Bild 49 zeigt, dass das Modell auch in diesem Bereich den Nettotransport realistisch abbildet. Diese Messung bestätigt zudem die Ergebnisse früherer Ganztidenmessungen in diesem Bereich. Im Jahr 2009 wurde am 06.07.2009 bei Gandersum mit der gleichen Methode ein Nettotransport von 5128 t stromauf ermittelt, und am 08.07.2009 ergab sich an einem Querschnitt bei Pogum der Nettotransport stromauf zu 6987 t (Maushake, 2009).

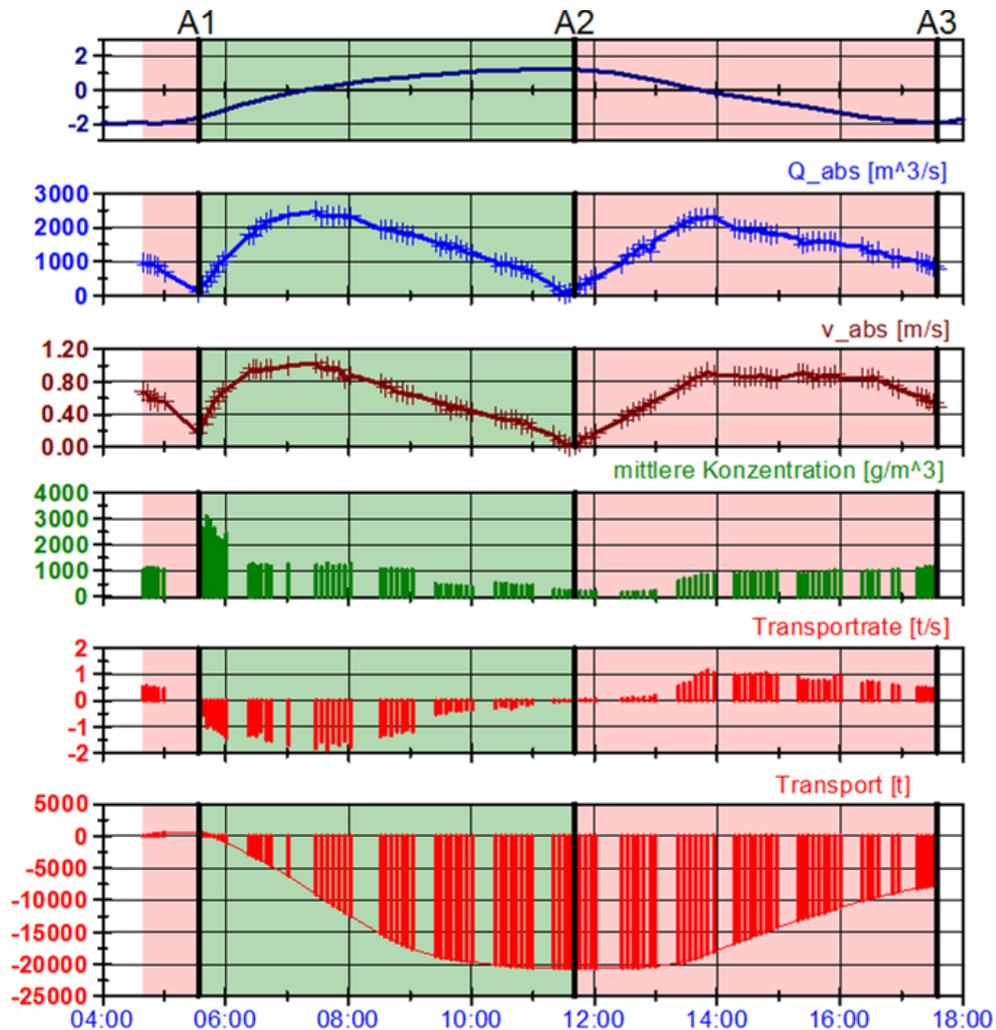


Bild 20: Querschnittsgemittelte Ergebnisse (Wasserspiegellage, Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit, mittlere Schwebstoffkonzentration, Transportrate, Transport) der Ganztidenmessung (28.06.2011) der Schwebstoffkonzentrationen bei Gandersum, ca. bei Ems-KM 34. Auffällig sind die hohen Schwebstoffkonzentrationen zu Beginn der Flutphase. Die Gesamtbilanz ergibt einen Nettotransport von 7581 t stromauf.

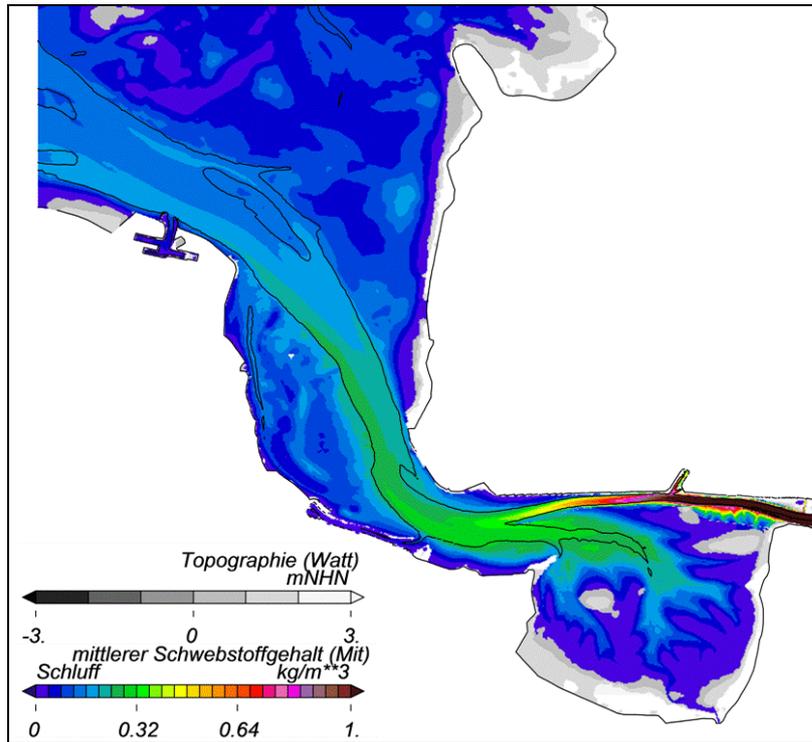


Bild 21: Mittlere Schwebstoffkonzentrationen (Modell Ist 2010) in der Außenems.

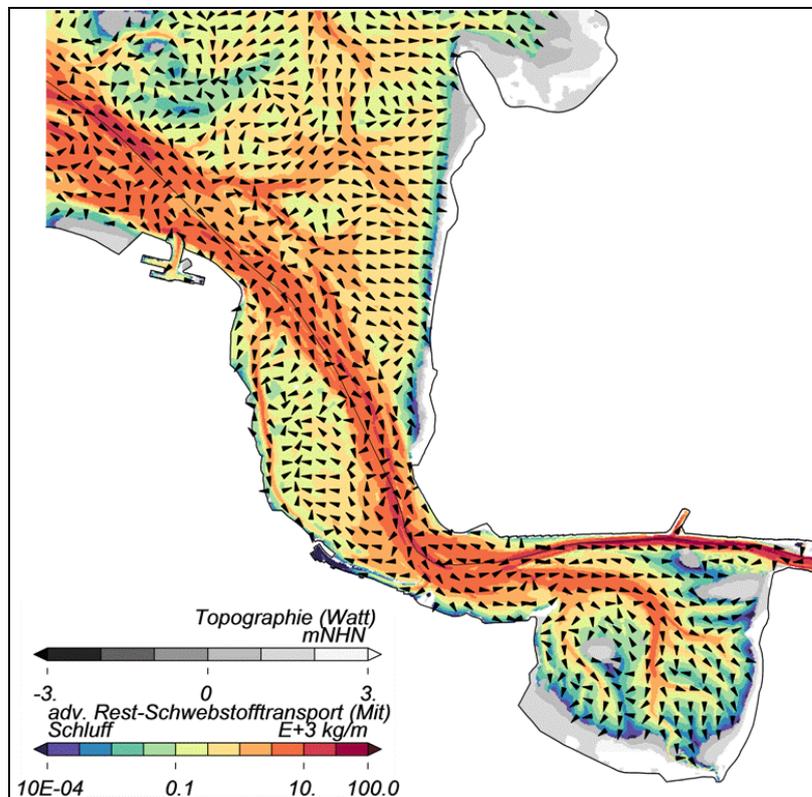


Bild 22: Mittlerer advektiver Rest-Schwebstofftransport (log. Skala) in der Außenems.

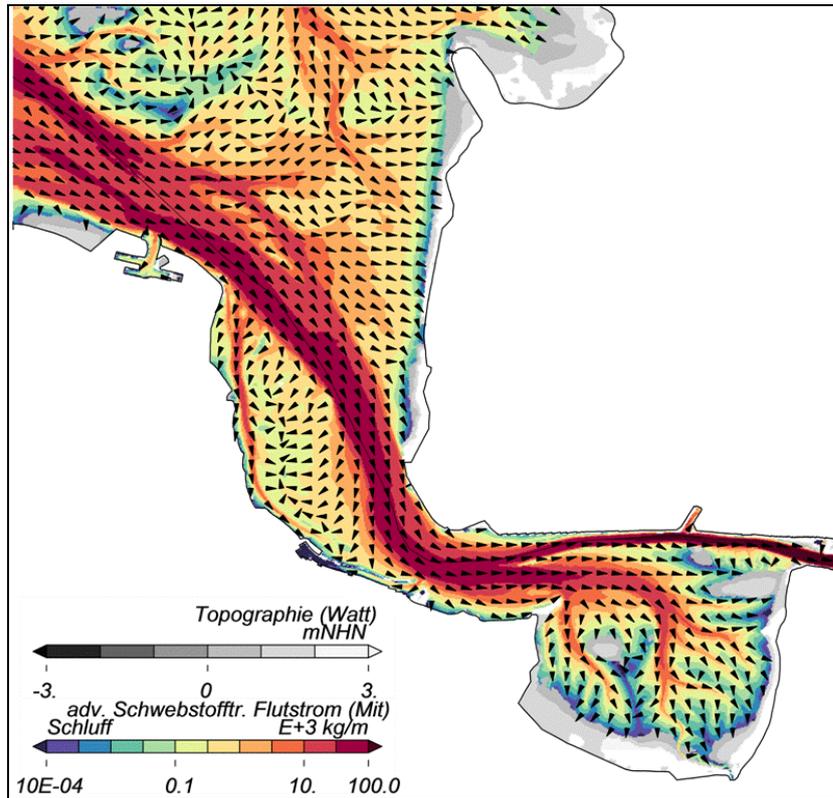


Bild 23: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport (Flutstrom, log. Skala).

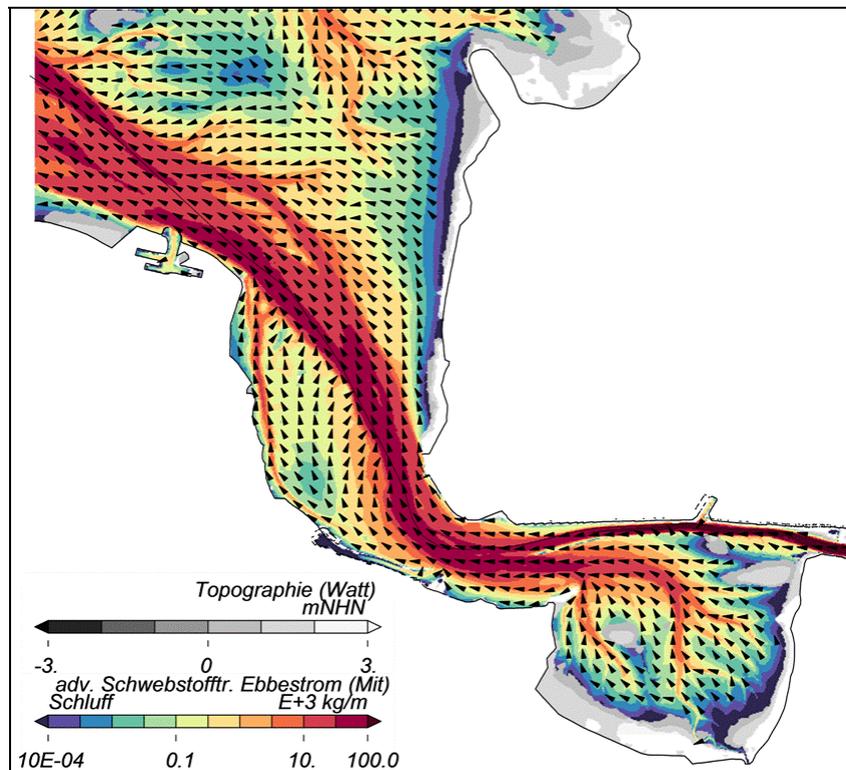


Bild 24: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport (Ebbestrom, log. Skala).

Im Sinne einer wissenschaftlich strengen Validierung sind die hier verwendeten Modellergebnisse nicht direkt mit den Messergebnissen vergleichbar, da die Mittelwerte der Tidekennwerte eines Spring-Nipp-Zyklus "moving boat"-Messungen gegenübergestellt werden. Dennoch zeigt dieser vereinfachte Vergleich, dass das Modell die Schwebstoffdynamik und den Schwebstofftransport in großen Teilen des Untersuchungsgebietes qualitativ und quantitativ ausreichend genau abbildet. Die Nettotransporte stromauf und stromab des Haupteingriffsgebietes Gatljebogen/Emder Fahrwasser prognostiziert das Modell zufriedenstellend genau. Zwischen Eemshaven und Knock nimmt der berechnete advective Rest-Schwebstofftransport stromauf von ca. 10.000 t/Tide auf etwa 2.000 t/Tide ab. Im Übergang zur Unterems liegt der advective Rest-Schwebstofftransport stromauf oberwasserabhängig bei ca. 5.000-7.000 t/Tide.

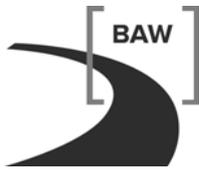
Diese Zahlen sind wichtig für die weiteren Ausführungen in diesem Gutachten, um die Einflüsse des Sedimentmanagements und die ausbaubedingten Änderungen richtig einschätzen zu können. Die Schwebstoffdynamik im Emden Fahrwasser wird hingegen vom Modell noch nicht zufriedenstellend wiedergegeben. Die dort in der Natur auftretende hochkonzentrierte Suspension und den dynamischen Übergang zum Flüssigschlick kann das Modell nicht simulieren. Die Modellierung dieser Phänomene ist immer noch Gegenstand der Forschung. Dieser Mechanismus ist entscheidend für die Akkumulation von Sedimenten, die in der Realität stärker auftritt als im Modell. Bei der Interpretation der Modellergebnisse muss dies berücksichtigt werden.

5.4.4 Von der Modellkalibrierung zur wasserbaulichen Systemanalyse

Die nach der Modellkalibrierung noch verbleibenden Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen können im Wesentlichen auf nicht erfasste lokale Windeffekte, Ungenauigkeiten in der Pegel- und Strömungsmessung, aber auch durch nicht zu vermeidende Modellungenauigkeiten, insbesondere durch die Vorgabe der horizontalen Auflösung und der damit verbundenen Vergrößerung zurückgeführt werden. Diese Abweichungen zwischen Messung und HN-Modell haben keine Auswirkungen auf die Prognosefähigkeit der verwendeten numerischen Modelle, solange die in der Natur dominanten physikalischen Prozesse und die durch den geplanten Ausbau veränderten physikalischen Prozesse im HN-Modell enthalten sind. Das HN-Modell ist keine vollkommen exakte Nachbildung eines bestimmten hydrodynamischen Zustandes, sondern ein mathematisch-numerisches Ersatzsystem für alle relevanten physikalischen Prozesse.

Parameter	HN-Modell des Ems-Ästuars
HN-Verfahren	UnTRIM 2007 gekoppelt mit SediMorph
Dimension	3D; z-Schichten; vertikale Auflösung 1 m
Zeitschritt	30 Sekunden
Horizontaler Impulsaustausch	Konstant 0,05 m ² /s
Vertikaler Impulsaustausch	k-eps-Turbulenzmodell (Rodi 1987)
Bodenreibung	Nikuradse
Reibungs-Koeffizienten	Außenems: 5 mm; Unterems: 120 µm
Salztransport	Ja
Horiz. Stoffaustausch	Konstant 0,1 m ² /s
Vertikaler Stoffaustausch	k-eps-Turbulenzmodell
Schwebstofftransport	Ja, eine Fraktion
1 Schluff	mittl. Korndurchm. 20 µm; Sinkgeschw. 0,36 mm/s
Horiz. Stoffaustausch	Konstant 0,1 m ² /s
Vertikaler Stoffaustausch	k-eps-Turbulenzmodell
Geschiebetransport	Ja, zwei Fraktionen
1 Feinsand	mittlerer Korndurchmesser 125 µm
2 Grobsand	mittlerer Korndurchmesser 500 µm

Tabelle 6: Parameter-Einstellungen des verwendeten HN-Modells für die Ems



6 Untersuchungskonzept

Ein Vorteil der Nutzung eines HN-Modells ist die gezielte Variation der Eingangsdaten des HN-Modells für vordefinierte Szenarien und Sensitivitätsstudien. In dieser Untersuchung werden die Eingangsdaten für den Oberwasserzufluss, den Anfangssalzgehalt und die Temperatursteuerung im Vergleich zur Kalibrierung verändert, um den Einfluss dieser Eingangsgrößen auf die ausbaubedingten Änderungen sichtbar zu machen.

6.1 Oberwasserzufluss-Szenarien

In der hier vorliegenden Untersuchung werden die Eingangsdaten des HN-Modells im Vergleich zur Kalibrierung bewusst verändert, um Aussagen zur Abhängigkeit von ausbaubedingten Änderungen bezüglich des Oberwasserzuflusses der Ems treffen zu können. Dazu sind insgesamt drei Oberwasserzufluss-Szenarien mit jeweils konstantem Oberwasserzufluss (OWZ) ausgewählt worden.

Name	OWZ Ems	OWZ Leda+Jümme	Beschreibung
M2	88 m ³ /s	24,2 m ³ /s	Mittlerer Abfluss
M1	44 m ³ /s	11,4 m ³ /s	Häufigster Abfluss
S1	25 m ³ /s	7,5 m ³ /s	Niedriger Abfluss

Tabelle 7: Oberwasserzufluss-Szenarien und die zugehörigen Abflüsse für Ems, Leda und Jümme im HN-Modell

6.1.1 M2 – Mittlerer Abfluss

Die Werte für den mittleren Abfluss sind dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch für das Jahr 2007 (NLWKN, 2011) entnommen worden: Der gewählte Oberwasserzufluss bei Herbrum entspricht dem langjährigen Mittelwert von 1941 bis 2007 für Versen (80,3 m³/s), multipliziert mit 1,1 um die seitlichen Zuflüsse zwischen Versen und der Modellgrenze bei Herbrum berücksichtigen zu können. Der gewählte Oberwasserzufluss für Leda und Jümme entspricht dem Mittelwert der Jahre 1998 bis 2007 für die Pegelstation Leer/Leda mit 24,2 m³/s.

6.1.2 M1 – Häufigster Abfluss

Für die Bestimmung des häufigsten Abflusswertes für die Ems sind die Tagesmittelwerte für Versen (Gesamt) für den Zeitraum 1. November 2001 bis 31. Oktober 2011 verwendet worden. Für drei unterschiedlichen Klassenbreiten (2 m³/s, 5 m³/s und 10 m³/s) sind alle Tagesmittelwerte des 10-Jahres-Zeitraums in die entsprechenden Oberwasserzufluss-Klassen einsortiert worden. Im letzten Schritt werden für alle Oberwasserzufluss-Klassen die Anzahl der einsortierten Tagesmittelwerte gezählt, grafisch aufgetragen (s. Bild 25) und das Maximum bestimmt.

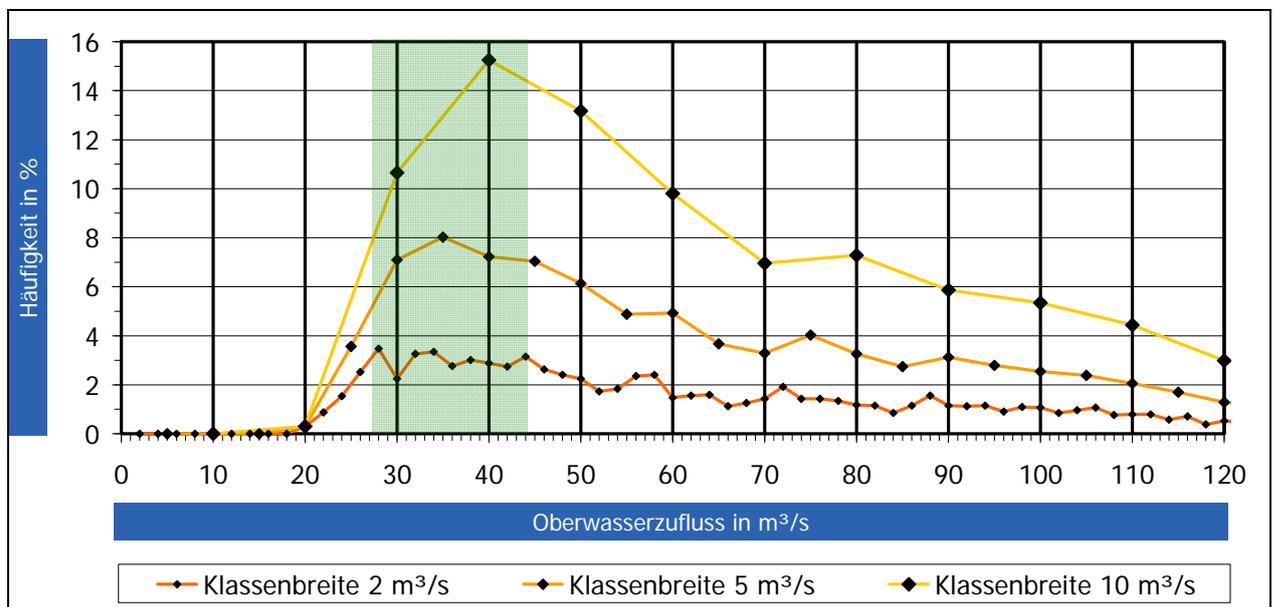


Bild 25: Häufigkeitsverteilung für 3652 Tagesmittelwerte des Abflusses Versen (Gesamt) für den Zeitraum 1 November 2001 bis 31. Oktober 2011 und für drei verschiedene Klassenbreiten. Grün hinterlegt der Wertebereich des Oberwasserzuflusses mit den höchsten Häufigkeiten

Für das Szenario M1 (häufigster Abfluss) ist für Versen der Wert 40 m³/s als häufigster Wert bestimmt worden. Dieser Wert wird mit 1,1 multipliziert als Oberwasserzuflusswert bei Herbrum in das HN-Modell eingesteuert.

Das Verhältnis zwischen dem mittleren und dem häufigsten Abflusswert für Versen beträgt 2. Dieses Verhältnis zwischen mittlerem und dem häufigsten Abflusswert wird auch für den Abflusswert für Leda und Jümme angesetzt, so dass sich auf Basis des mittleren Abflusses für den Pegel Leer/ Leda von 22,8 m³/s gemäß Deutschem Gewässerkundlichen Jahrbuch 2005 (NLWKN, 2009) der häufigste Abflusswert für Leda und Jümme zu 11,4 m³/s ergibt.

6.1.3 S1 – Niedriger Abfluss

Für das Szenario mit niedrigem Abfluss ist ein repräsentativ niedriger Abflusswert für den Zeitraum eines Spring-Nipp-Zyklus' gesucht worden, weil der Analysezeitraum zur Bestimmung der Tidekennwerte ebenfalls einen Spring-Nipp-Zyklus abdeckt. Der Mittelwert der Tagesmittelwerte für Versen (Gesamt) für den 15-Tage-Zeitraum 19. September bis 3. Oktober 2009 von $24,8 \text{ m}^3/\text{s}$ ist aufgerundet auf $25 \text{ m}^3/\text{s}$ als Abflusswert für das HN-Modell verwendet worden.

Das Verhältnis zwischen dem mittleren und dem niedrigen Abflusswert für Versen beträgt 3,24. Dieses Verhältnis zwischen mittlerem und dem niedrigen Abflusswert wird auch für den Abflusswert für Leda und Jümme angesetzt, so dass sich auf Basis des mittleren Abflusses für den Pegel Leer/ Leda von $24,2 \text{ m}^3/\text{s}$ gemäß Deutschem Gewässerkundlichem Jahrbuch 2007 (NLWKN, 2011) der niedrige Abflusswert für Leda und Jümme zu $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt.

6.1.4 Anfangssalzgehalt

Näherungsweise passend zu den gewählten Oberwasserzufluss-Szenarien sind auch die Salzanfangsverteilungen definiert worden. Dazu sind aus den Messungen des Salzgehalts an den verschiedenen Pegelstationen entlang der Ems zum gewählten Oberwasserzufluss passende Werte als Stützstellen für eine lineare Interpolation des Salzgehalts ausgewählt worden.

Für die Szenarien mit mittlerem und mit häufigstem Abfluss sind die Mittelwerte des Salzgehalts der Pegelstationen entlang der Ems für den Zeitraum von 1999 bis 2008 verwendet worden. Für das Szenario mit niedrigem Abfluss sind die Mittelwerte des Salzgehalts der Pegelstationen entlang der Ems für den 1. September 2009 verwendet worden. Allen Szenarien gemein ist, dass das HN-Modell einen Spring-Nipp-Zyklus nutzt, um die Salzverteilung im Ems-Ästuar passend zum gewählten Oberwasserzufluss Einschwingen zu lassen. Erst der folgende Spring-Nipp-Zyklus wird für die Analyse der Tidekennwerte verwendet. Deshalb unterscheidet sich der Salzgehalt im Ems-Ästuar zu Beginn des Analyse-Zeitraums in allen drei Szenarien (s. Bild 26)

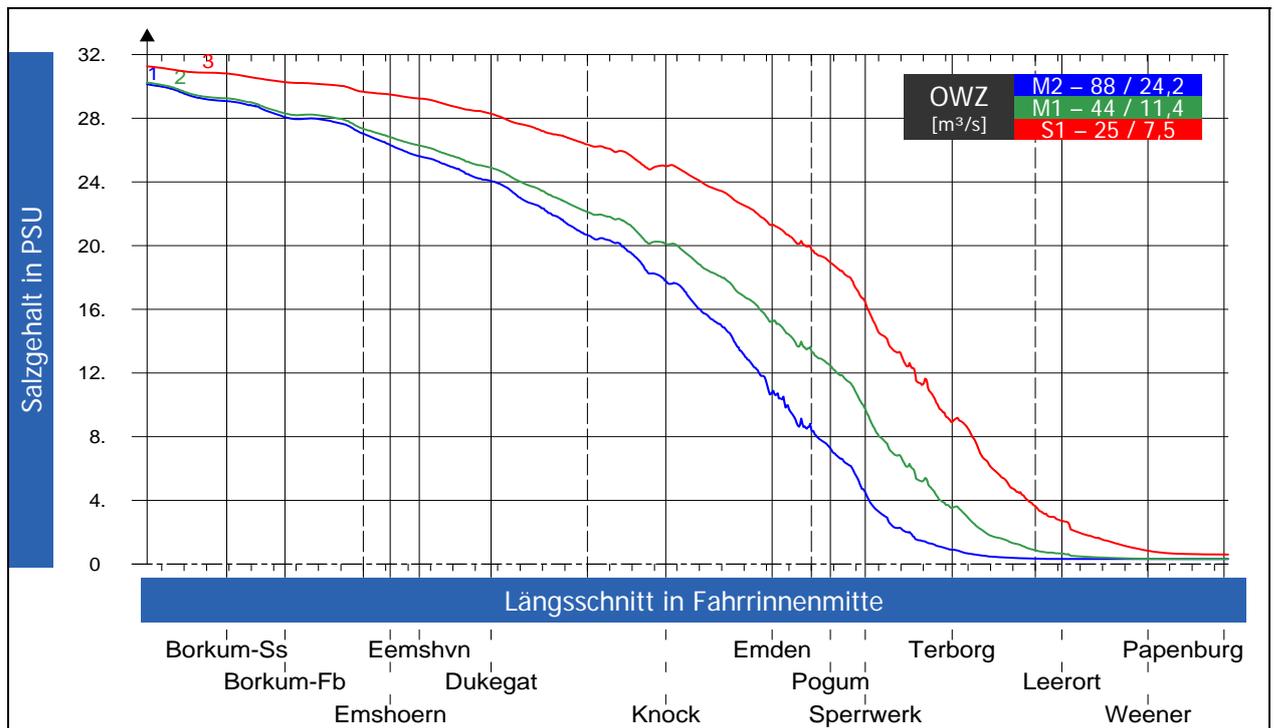


Bild 26: Tiefengemittelter Salzgehalt in Fahrrinnenmitte für den planerischen Sollzustand PS1 für die drei Szenarien M2 (mittlerer Abfluss in blau), M1 (häufigster Abfluss in grün) und S1 (niedriger Abfluss in rot) zu Beginn des Analysezeitraums zur Bestimmung der Tidekennwerte (6. Mai 2010 08:00 Uhr).

6.1.5 Temperatursteuerung

Für die Szenarien mit mittlerem und mit häufigstem Abfluss wird die Temperatur im HN-Modell so gesteuert, dass nur der Effekt der Kühlwasser-Entnahmen und –Einleitungen der drei berücksichtigten Kraftwerke in Eemshaven berücksichtigt sind (Bild 27). Auf diesem Wege kann die ausbaubedingte Veränderung der Ausbreitung der Kühlwasserfahnen festgestellt werden.

Für das Szenario mit niedrigem Abfluss werden zusätzlich die folgenden Effekte berücksichtigt:

- Zunahme der Temperatur auf dem Seerand von 20 °C auf 22 °C im Verlauf der zwei simulierten zwei Spring-Nipp-Zyklen.
- Zunahme der Temperatur aller Oberwasserzuflüsse von 23 °C auf 25 °C im Verlauf der zwei simulierten zwei Spring-Nipp-Zyklen.
- Sinusförmiger Tagesgang der Temperatur der Atmosphäre zwischen 18 °C im Minimum um 04:00 Uhr morgens und 32 °C im Maximum um 16:00 Uhr. Berücksichtigung des orts-

und zeitvariablen Wärmeflusses zwischen Atmosphäre und Wasserkörper bedingt durch die Temperaturdifferenz.

- Konstanter Wärmefluss von $0,063 \text{ W/m}^2$ vom Boden unterhalb des Wasserkörpers in den Wasserkörper hinein.

Mit dieser Temperatursteuerung kann die ausbaubedingte Veränderung der Temperatur während einer sommerlichen Warmperiode festgestellt werden.

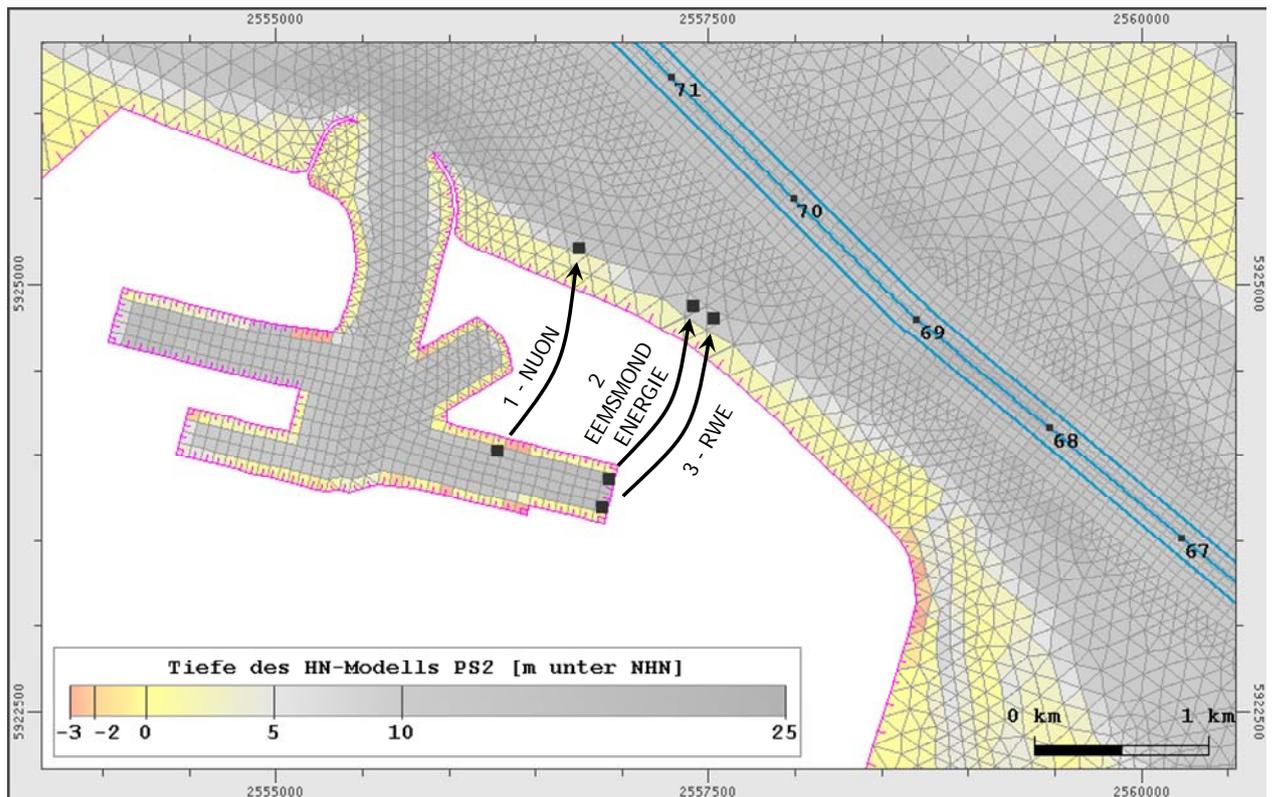


Bild 27: Berücksichtigte Entnahmen und –Einleitungen zur Kühlung von Kraftwerken:

1: Kraftwerk NUON mit einem Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Temperatur-Zunahme von 7 K , berücksichtigt in PS1, PS2 und AZ1

2: Kraftwerk Eemsmund Energie mit einem Volumenstrom von $25 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Temperatur-Zunahme von 7 K , berücksichtigt in PS2 und AZ1

3: Kraftwerk RWE mit einem Volumenstrom von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Temperatur-Zunahme von 7 K , berücksichtigt in PS1, PS2 und AZ1

6.2 Bestimmung der ausbaubedingten Änderung

Aus den von dem HN-Modell berechneten Zustandsgrößen werden die Tidekennwerte des Wasserstands, der Strömung, der Temperatur, des Salz- und des Schwebstoffgehaltes sowie der zugehörigen Salz-, Schwebstoff- und Wärmetransportgrößen, des Geschiebetransportes und der effektiven Bodenschubspannungen errechnet, um die Wirkungen des zu untersuchenden Ausbaus zu quantifizieren. Die Analyseverfahren und -parameter sind ausführlich im BAW-Mitteilungsblatt Nr. 86 (Lang, 2003) und auf den Internetseiten der BAW dokumentiert:

[Analyse der Berechnungsergebnisse – BAW-Methoden-Wiki.](#)

Für die Bestimmung der ausbaubedingten Änderungen werden zunächst getrennt für den Ausbauzustand und für einen planerischen Sollzustand die Tidekennwerte für alle Gitterpunkte im Modellgebiet analysiert. Danach erfolgt die Differenzbildung zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Sollzustand ebenfalls für alle Gitterpunkte im Modellgebiet.

Die Rechenwerte aus der Modellsimulation und -analyse bedürfen der fachwissenschaftlichen Interpretation, um fundierte Prognosen über veränderte Wirkungen abzugeben. Die Berechnungsergebnisse sind somit nicht die alleinige Grundlage der gutachterlichen Aussagen, weil sowohl die gewässerkundlichen Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet, als auch die revier- und methodenspezifischen Erfahrungen des Gutachters in der wasserbaulichen Systemanalyse mit in die Bewertung einfließen müssen.

6.2.1 Flächenhafte Darstellung von Analysegrößen

Alle Zustandsgrößen und alle Tidekennwerte können für jeden planerischen Sollzustand oder Ausbauzustand ebenso wie für die Differenzen des Ausbauzustands zu einem planerischen Sollzustand flächenhaft dargestellt werden. In der flächenhaften Darstellung werden die Werte zu Bereichsklassen zusammengefasst und farblich kodiert dargestellt. Werte außerhalb des Wertebereichs werden separat mit den Farbwerten eingefärbt, die in den beiden Dreiecken am Anfang und Ende der Farblegende dargestellt sind. Ein Teil dieser Abbildungen enthalten eine mit Topographie (Watt) bezeichnete und mit unterschiedlichen Grauwerten aufgefüllte Legende von NN -3 m bis NN +3 m. In der flächenhaften Darstellung ist diese Topographie nur sichtbar, wo die Werte der eigentlich darzustellenden physikalischen Größe z.B. wegen des Trockenfallens von Wattflächen nicht vorhanden sind. Die Abbildungen enthalten zusätzlich die Linie gleicher Wassertiefe für NHN-5 m und ausgewählte Strukturlinien (Fahrwassergrenze, Wendestelle und Leitdämme und Bühnen im Bereich des Emders Fahrwassers). So können z.B. Wattflächen und die tiefen Rinnen identifiziert werden.

6.2.2 Darstellung im Längs- und Querschnitt

Zusätzlich zur flächenhaften Darstellung kann auch die Darstellung der Zustandsgrößen und Tidekennwerte auf ausgewählten Längs- und Querschnitten erfolgen. Im HN-Modell sind ein Längsprofil von der Nordsee entlang der Fahrinnenmitte bis zum Schleusenarm Herbrum, sowie eine Reihe von Querprofilen senkrecht zur Fahrrinne definiert worden (s. Bild 28).

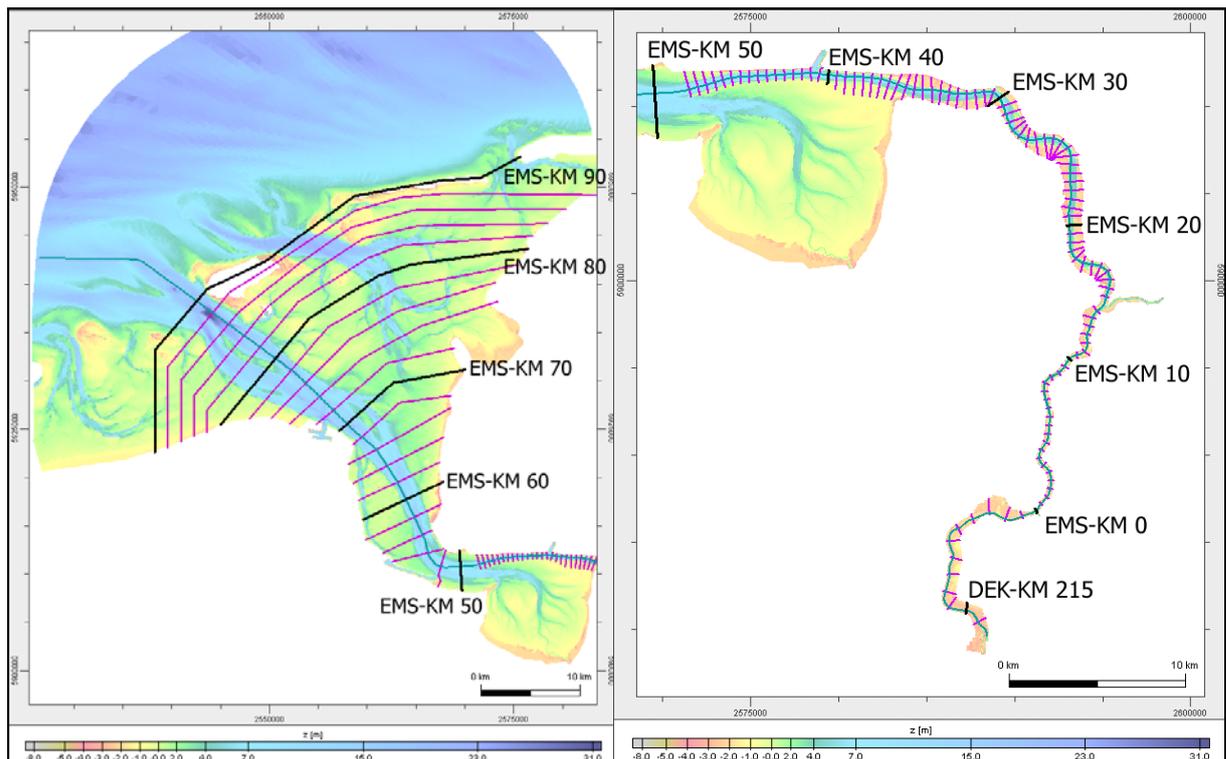
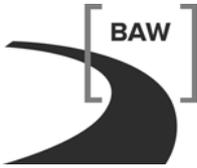


Bild 28: Lage der im HN-Modell definierten Querprofile. Der Abstand in Fahrinnenrichtung zwischen zwei Querprofilen beträgt in der Außenems 2 km, im Emders Fahrwasser, in der Unterems 500 m und im Dortmund-Ems-Kanal 1 km.

Die Darstellung erfolgt in Form eines Liniendiagramms für 2D-Größen oder für tiefengemittelte 3D-Größen, als auch in einer farbkodierten Form, aus der die Abhängigkeit der dargestellten Größe von der Lage und der Tiefe hervorgeht.



6.2.3 Darstellung Querprofil-integrierter Tidekennwerte im Längsschnitt

Die im HN-Modell auf Querprofilen abgelegten Zustandsgrößen können getrennt für jedes Querprofil integriert werden, so dass nach der Integration für jedes Querprofil und jeden Zeitpunkt nur noch genau ein Datenwert pro Zustandsgröße vorhanden ist. Diese verdichteten Zustandsgrößen eignen sich zur Analyse der Volumen-, Massen- und Wärmeflüsse. Die aus diesen Flüssen abgeleiteten Tidekennwerte aller Querprofile werden im Längsschnitt als Liniendiagramm dargestellt.

7 Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Hydrodynamik

7.1 Die neue Solltiefe

Die geplante Solltiefe in der Außenems zwischen Ems-KM 74,6 und Emden führt auf der Basis der Messungen von 2010 (ARGE Unter-/Außenems, 2012) auf dem Abschnitt zwischen Knock und Emden zu einer Vertiefung der Fahrrinne. Zusätzlich muss zur Herstellung der neuen Solltiefe auf vier Abschnitten zwischen dem Abzweig der Zufahrt nach Eemshaven und Knock die Fahrrinne vertieft werden (s. Bild 29 unten). Die weiteren Maßnahmen zur Herstellung des Ausbauzustands sind:

2. Herstellung einer Wendestelle vor Emden durch die Verbreiterung der Fahrrinne zwischen Ems-Kilometer 41,2 und 42,1 auf einer Länge von 900 . Die Fahrrinne wird nach Norden um ca. 80 m und nach Süden um ca. 140 m verbreitert. Die Verbreiterung nach Süden führt zu Differenztiefen von bis zu 6 m, weil die Verbreiterung in die Nähe der bestehenden Böschung zum Geiseleitdamm reicht.
3. Übergang der Solltiefen vom Emden Fahrwasser in die Unterems auf einer Länge von ca. 100 m. Hier treten Differenztiefen zwischen 2 und 3 m auf.
4. Verlängerung des Buhnenpaares 6/7 auf Höhe Ems-KM 47,0 zur Reduzierung der hydraulisch wirksamen Querschnittsfläche.

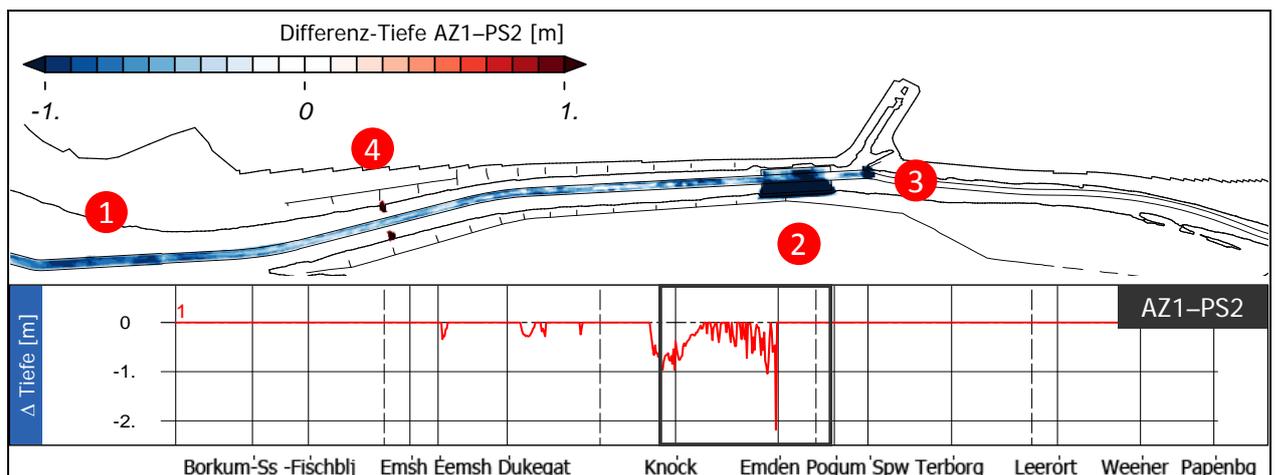


Bild 29: Im HN-Modell durchgeführte Vertiefungen zur Herstellung der geplanten Solltiefe
 Oben: Draufsicht für den Abschnitt Emden Fahrwasser
 Unten: Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg

7.2 Wirkung des Ausbaus auf den Wasserstand

7.2.1 Wirkung der Vertiefung der Fahrrinne und der Wendestelle

Die Herstellung der neuen Solltiefen führt zu einer Zunahme der hydraulischen Leistungsfähigkeit in den Abschnitten der Außenems, in denen die Zunahme der Solltiefe auch zu einer realen Baggeraktivität zur Herstellung dieser Solltiefe führt. Eine Folge der Zunahme der hydraulischen Leistungsfähigkeit ist die Zunahme des Tidehubs als Maß für die verringerte Dissipation der von See kommenden Tideenergie (s. Bild 30, mittleres Diagramm). Die Dissipation der Tideenergie verringert sich, weil mit ausbaubedingt zunehmender Wassertiefe der Einfluss der Bodenreibung auf die Dissipation abnimmt.

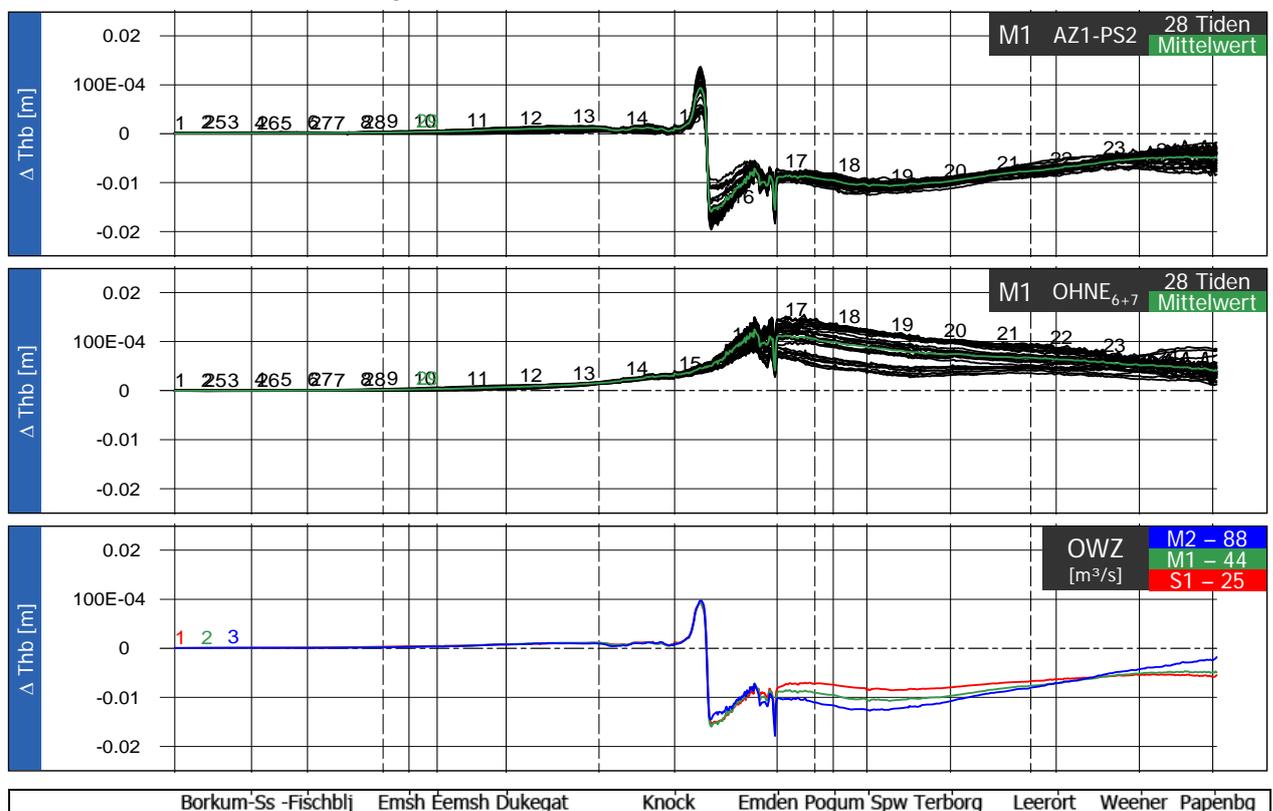


Bild 30: Ausbaubedingte Änderung des Tidehubs im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot).

7.2.2 Wirkung des Ausbaus inkl. Querschnittseinengung

Eine Zunahme des Tidehubs ist in der Unterems auch mit einer Zunahme der Tideasymmetrie und mit einer Zunahme des stromaufgerichteten Netto-Transportes von Schwebstoffen verbunden. Deshalb wurde als zusätzliche Ausbau-Maßnahme die Querschnittseinengung durch Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 entwickelt, um die nachteilige Wirkung des Ausbaus auf die Unterems zu minimieren (BAW, 2011).

Zusammen mit der Querschnittseinengung ergibt sich für die ausbaubedingte Änderung des Tidehubs ein anderes Bild: Im Emden Fahrwasser von Emden bis zur Querschnittseinengung nimmt der Tidehub um 1 bis 2 cm ab, in der Unterems und Dortmund-Ems-Kanal (DEK) bis Herbrum bis zu 1 cm. Die Abnahme fällt umso kräftiger aus, je geringer die Entfernung von der Querschnittseinengung ist (s. Bild 30, oben).

Die Querschnittseinengung bestimmt die Qualität der ausbaubedingten Änderung der Wasserstände. Trotz Vertiefung und dadurch zu erwartender Zunahme des Tidehubs nimmt der Tidehub stromauf von der Querschnittseinengung ab, weil den durch Bühnenverlängerung eingeengten Querschnitt in beiden Tidephasen weniger Wasservolumen passieren kann. Daraus folgt, dass das Tideprisma oberstromseitig reduziert wird, das Tideniedrigwasser steigt oberstromseitig um bis zu 2 cm im Emden Fahrwasser und um bis zu 1 cm in der Unterems und im DEK an (s. Bild 31, oben) und das Tidehochwasser nimmt oberstromseitig im Mittel um weniger als 1 cm ab (s. Bild 32, oben).

Seewärts von der Querschnittseinengung nimmt der Tidehub zu, weil während der Flutphase Flutstromvolumen unverändert aus der Nordsee transportiert wird, aber weniger Volumen durch den eingeengten Querschnitt in Richtung Emden Fahrwasser und Unterems weiter transportiert wird. Die Zunahme des Tidehubs beträgt im Emden Fahrwasser seewärts der Querschnittseinengung bis zu 1 cm, in der Außenems deutlich weniger als 1 cm. Der Wasserstand steigt während des Tidestiegs schneller an, das Tidehochwasser nimmt tendenziell zu, aber deutlich weniger als 1 cm. Während der Ebbephase fließt Ebbstromvolumen unverändert Richtung Nordsee, aber durch den eingeengten Querschnitt fließt weniger Ebbstromvolumen nach, so dass der Wasserstand im Tidefall schneller sinkt und das Tideniedrigwasser ebenso absinkt. Dieser Effekt ist maßgeblich für die Änderung des Tidehubs, entsprechend sinkt das Tideniedrigwasser im Emden Fahrwasser seewärts der Querschnittseinengung um bis zu 1 cm ab, in der Außenems beträgt die Änderung deutlich weniger als 1 cm.

Dies gilt für alle untersuchten Oberwasserzufluss-Szenarien. Im Nahfeld der Querschnittseinengung unterscheiden sich die ausbaubedingten Änderungen des Wasserstands bei variablem Oberwasserzufluss nicht. In der Unterems und im DEK schwächt sich die Tidehub reduzierende Wirkung der Querschnittseinengung mit abnehmendem Oberwasserzufluss ab, bleibt aber qualitativ auch für niedrigen Oberwasserzufluss erhalten (s. Bild 30, Bild 31 und Bild 32, jeweils unteres Diagramm).

Bei geöffnetem Ledasperrwerk reichen die Änderungen des Wasserstandes bis in das Leda-Jümme-Gebiet hinein und sind quantitativ entsprechend den Änderungen in der Unterems: Der Tidehub und das Tidehochwasser nehmen weniger als 1 cm ab, das Tideniedrigwasser weniger als 1 cm zu. Bei geschlossenem Ledasperrwerk reichen die Änderungen des Tidehochwassers entsprechend bis zum Ledasperrwerk.

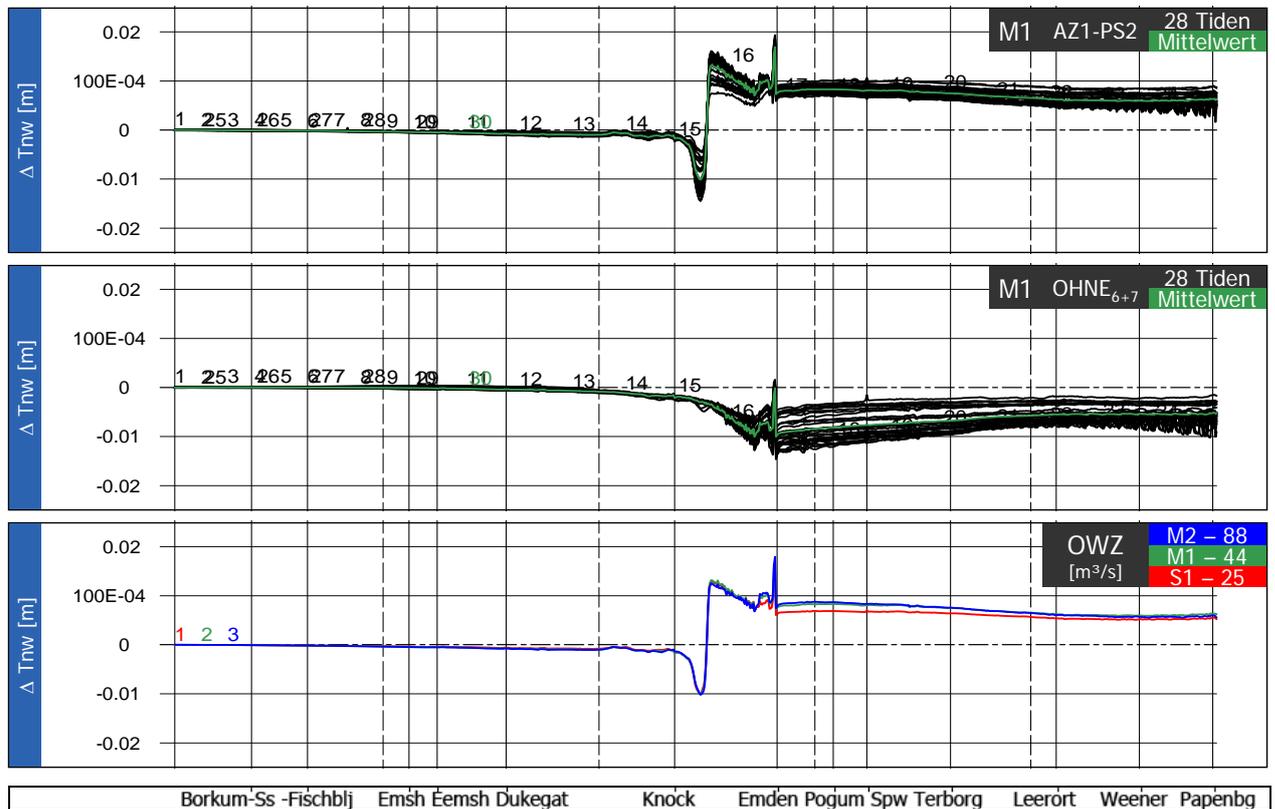


Bild 31: Ausbaubedingte Änderung des Tideniedrigwassers im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot).

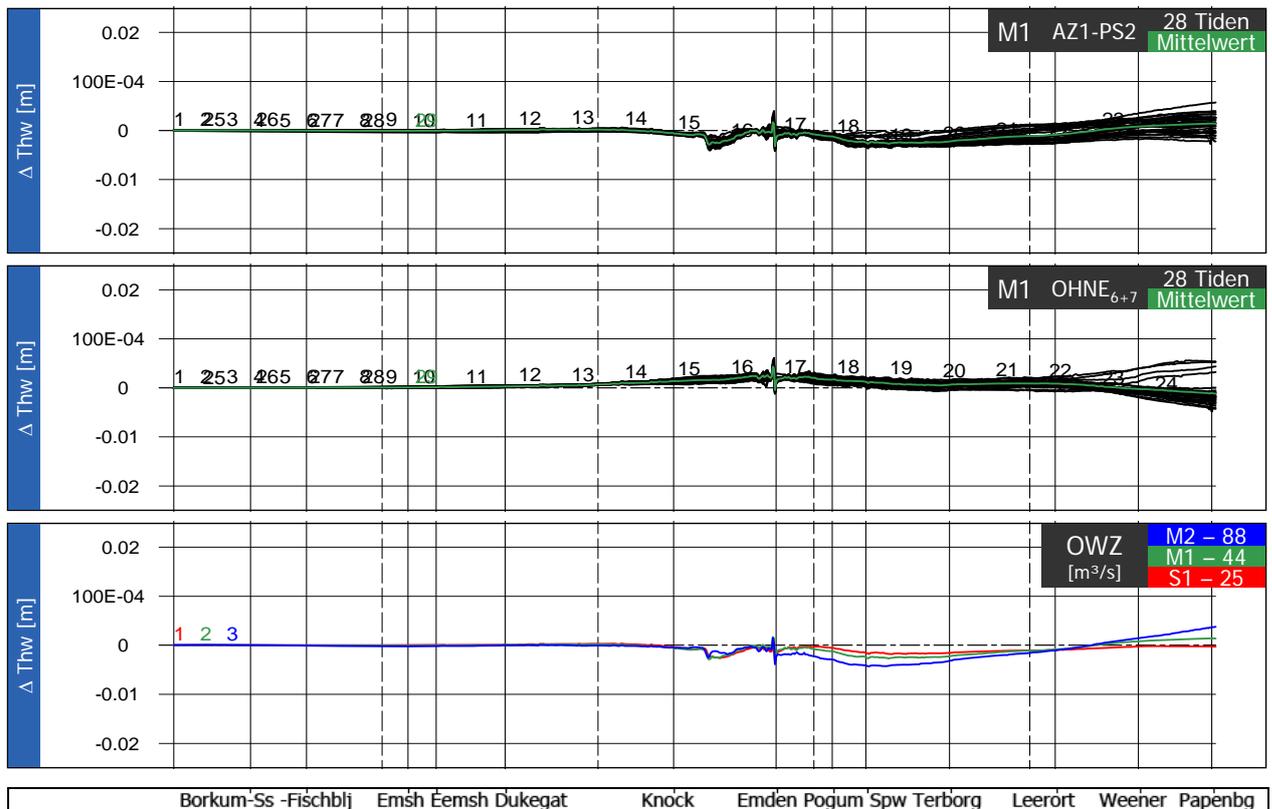


Bild 32: Ausbaubedingte Änderung des Tidehochwassers im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

7.3 Wirkung des Ausbaus auf die Strömungsgeschwindigkeiten

7.3.1 Wirkung der Vertiefung der Fahrrinne und der Wendestelle

Grundsätzlich gilt, dass eine Vergrößerung des Fließquerschnitts durch eine Vertiefung, bzw. Verbreiterung des Fahrwassers zu einer Erhöhung der hydraulischen Leistungsfähigkeit führt und den Durchfluss erhöht. In Abschnitten, in denen kein Eingriff in die Topographie vorgenommen werden muss, erhöht sich deshalb die Strömungsgeschwindigkeit proportional zur Erhöhung des Tidevolumens. In den Bereichen, in denen der Fließquerschnitt infolge der Vertiefung oder Verbreiterung aufgeweitet wird, fällt die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit geringer aus oder die Strömungsgeschwindigkeit wird sogar reduziert.

7.3.2 Wirkung des Ausbaus inkl. Querschnittseinengung

Energetisch betrachtet wird ein Teil der einlaufenden Tideenergie an der Querschnittseinengung reflektiert, ein weiterer Anteil durch zusätzliche Turbulenz und erhöhte Reibung dissipiert, so dass weniger Tideenergie in Richtung Emden und in die Unterems gelangt. Dies zeigt sich auch an den Durchflüssen, z.B. für Querprofil Ems-Kilometer 46, stromauf der Querschnittseinengung. Während der Flutphase ist der Durchfluss gegenüber dem planerischen Sollzustand PS2 reduziert. Für den Durchfluss während der Ebbphase gilt dies nicht im gleichen Umfang, weil zusätzliches Wasservolumen über den Geiseleiddamm vom Dollart in das Emdener Fahrwasser gelangt (s. Bild 33).

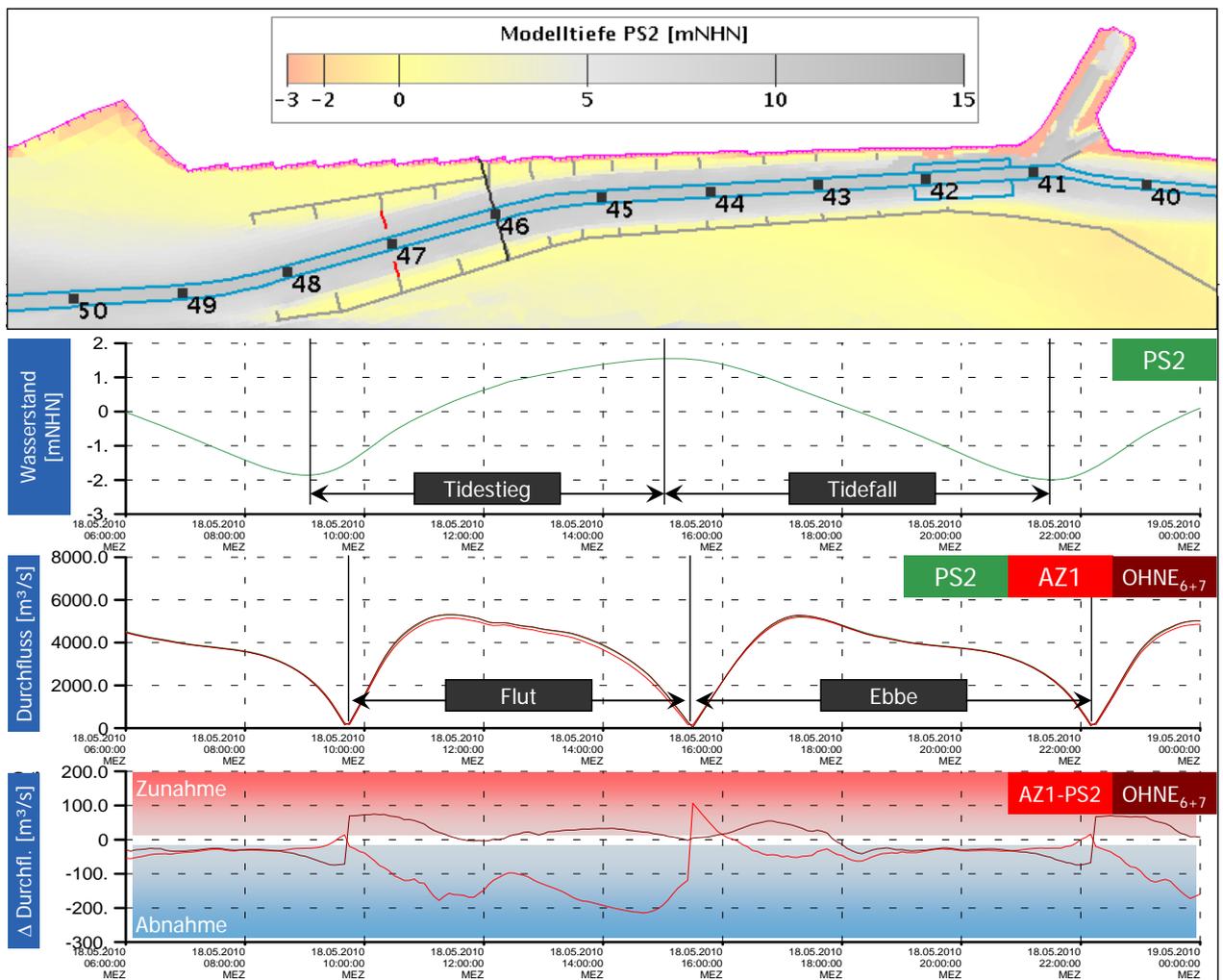


Bild 33: Wasserstand (Mitte oben), Durchfluss (Mitte unten) und ausbaubedingte Änderung des Durchflusses (ganz unten) für Querprofil Ems-Kilometer 46 (ganz oben) für den planerischen Sollzustand PS2 (grün), den Ausbauzustand AZ1 (rot) und Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung (braun) für den Zeitraum einer Tide (18.5.2010 von 06:00 Uhr bis 24:00 Uhr).

Die ausbaubedingten Änderungen der Strömung werden für alle untersuchten Oberwasserzuzfluss-Szenarien durch die folgenden geplanten Einzelmaßnahmen geprägt:

1. Querschnittseinengung in Folge der Verlängerung des Bühnenpaares 6/7
2. Verbreiterung zur Wendestelle
3. veränderter Übergang zur Unterems

Dabei ist die Querschnittseinengung diejenige mit der größten Einzelwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeiten:

- Zunahme der maximalen und mittleren Flutstromgeschwindigkeit von der Querschnittseinengung bis wenige Kilometer stromaufwärts bedingt durch höhere Wasserspiegelgradienten in Folge der Querschnittseinengung. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,3 m/s, die mittlere Flutstromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,2 m/s (Bild 34 und Bild 35, jeweils oben).
- Zunahme der maximalen und mittleren Ebbestromgeschwindigkeit von der Querschnittseinengung bis wenige Kilometer stromabwärts bedingt durch höhere Wasserspiegelgradienten in Folge der Querschnittseinengung. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,35 m/s, die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit steigt im Maximum um nicht mehr als 0,25 m/s (Bild 36 und Bild 37, jeweils oben).

Weitere deutliche Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit und ihre Ursachen:

- Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Wendestelle als Folge der Querschnittsaufweitung durch Vertiefung und insbesondere Verbreiterung der Fahrrinne um nicht mehr als 0,15 m/s.
- Anpassung der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich des Übergangs vom Emdener Fahrwasser zur Unterems auf Höhe Emden, bedingt durch die ca. 100m lange Anpassungsstrecke der Solltiefen im Übergang vom Emdener Fahrwasser in die Unterems. Die Abnahmen der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit betragen nicht mehr als 0,2 m/s und die Zunahmen nicht mehr als 0,1 m/s.

Seewärts der geplanten Maßnahme und stromauf des Emssperrwerkes, sowie im Dollart und im Leda-Jümme-Gebiet betragen die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten weniger als 2,5 cm/s.

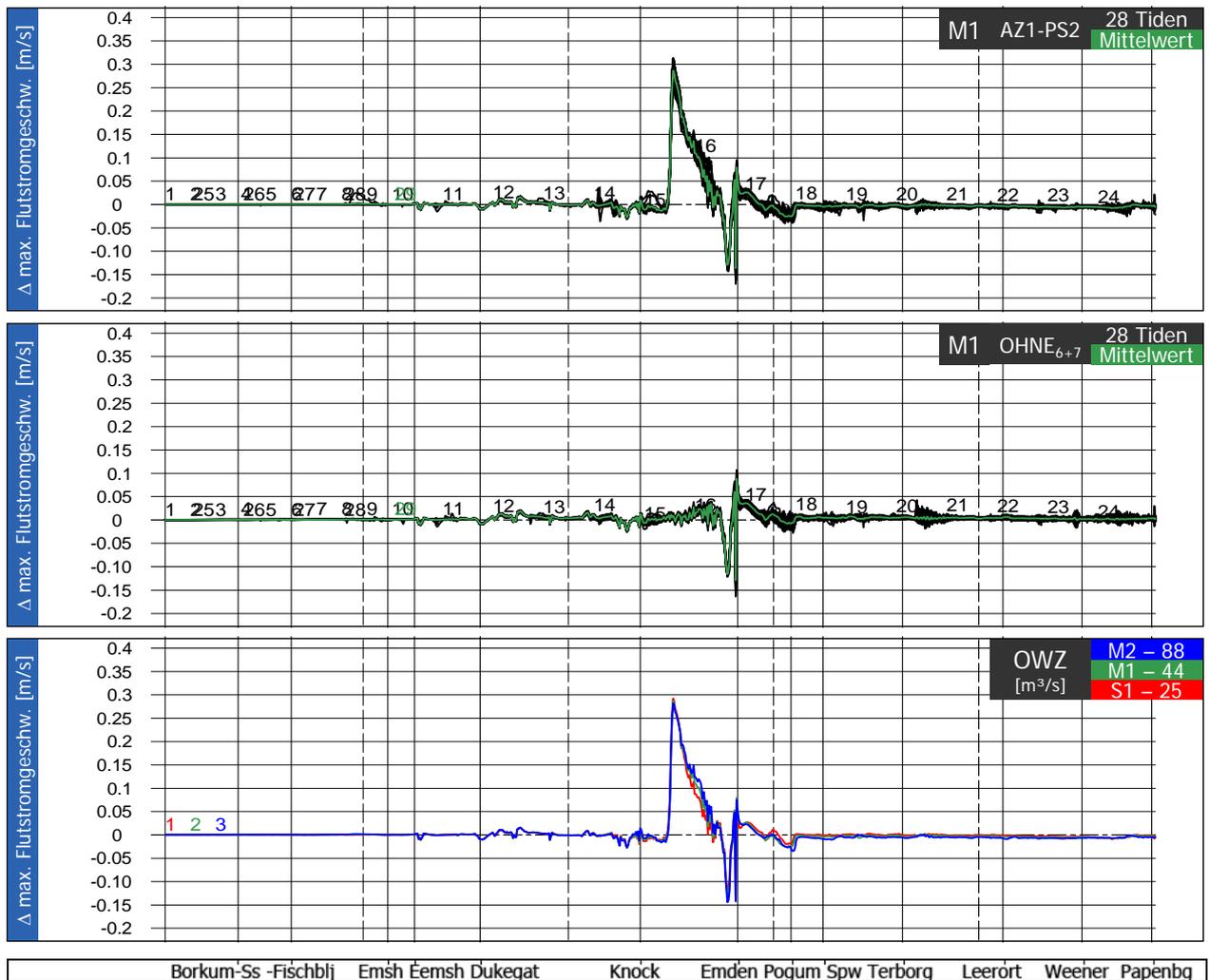


Bild 34: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten maximalen Flutstromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

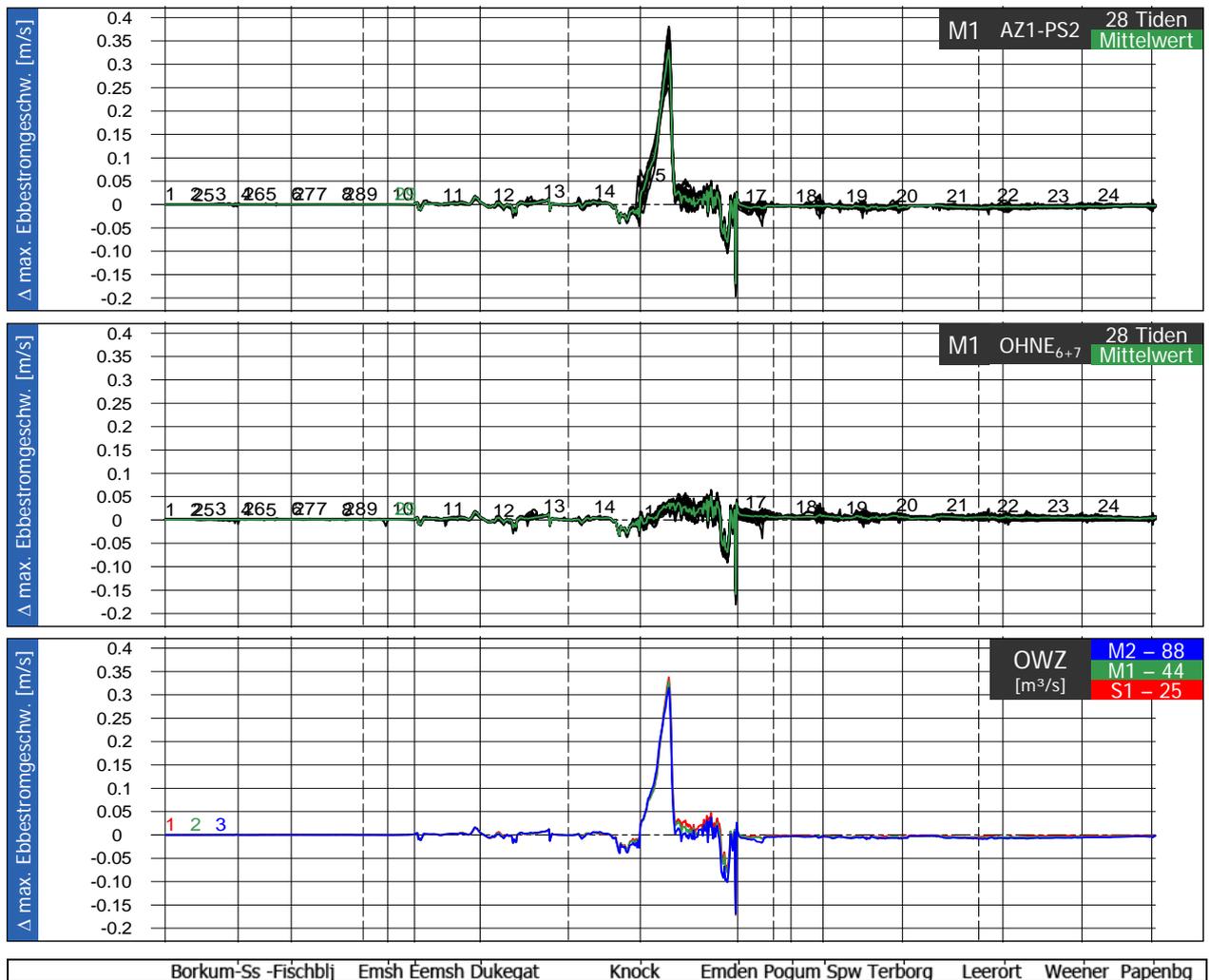


Bild 35: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten maximalen Ebbestromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

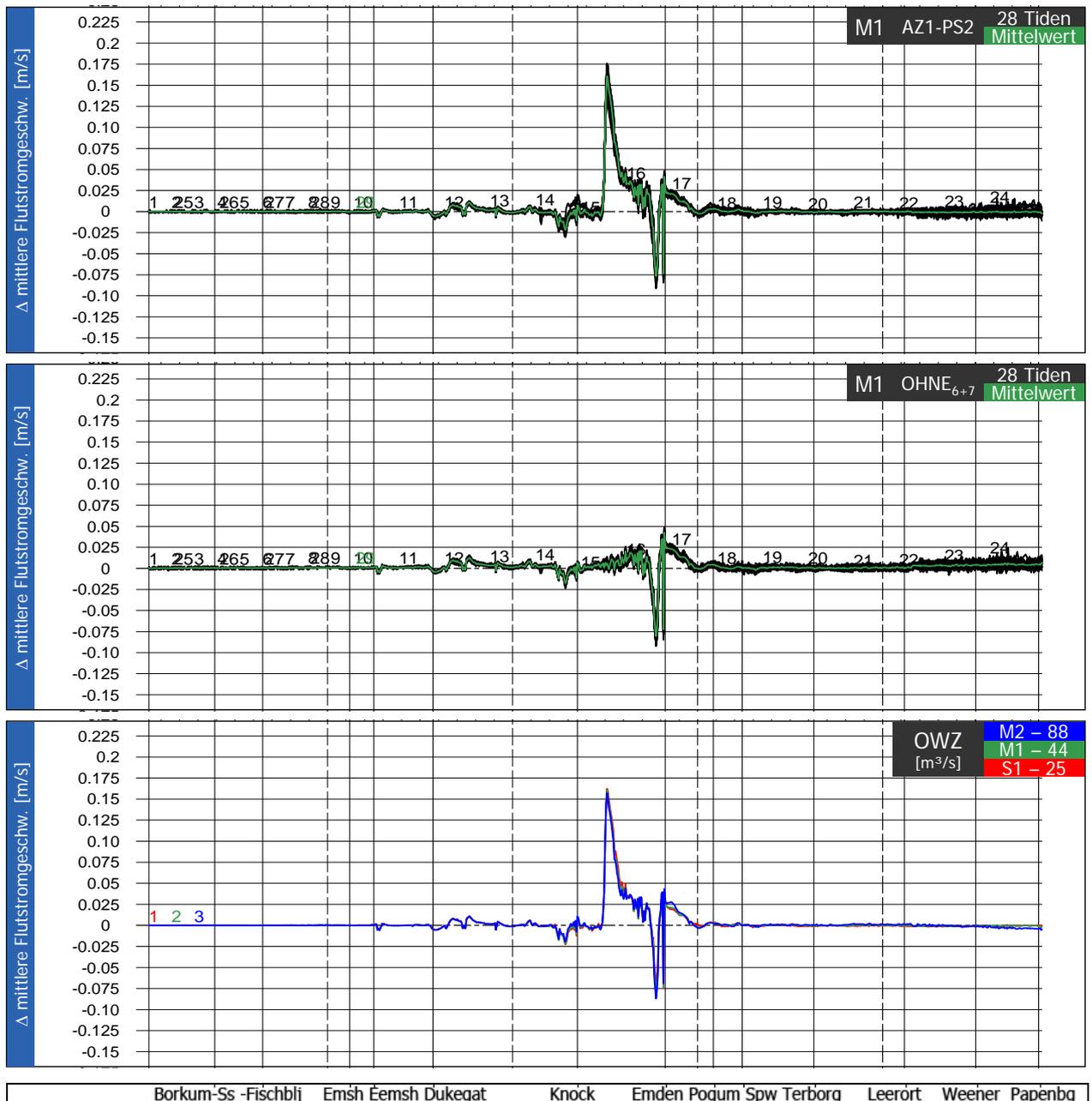


Bild 36: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Flutstromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

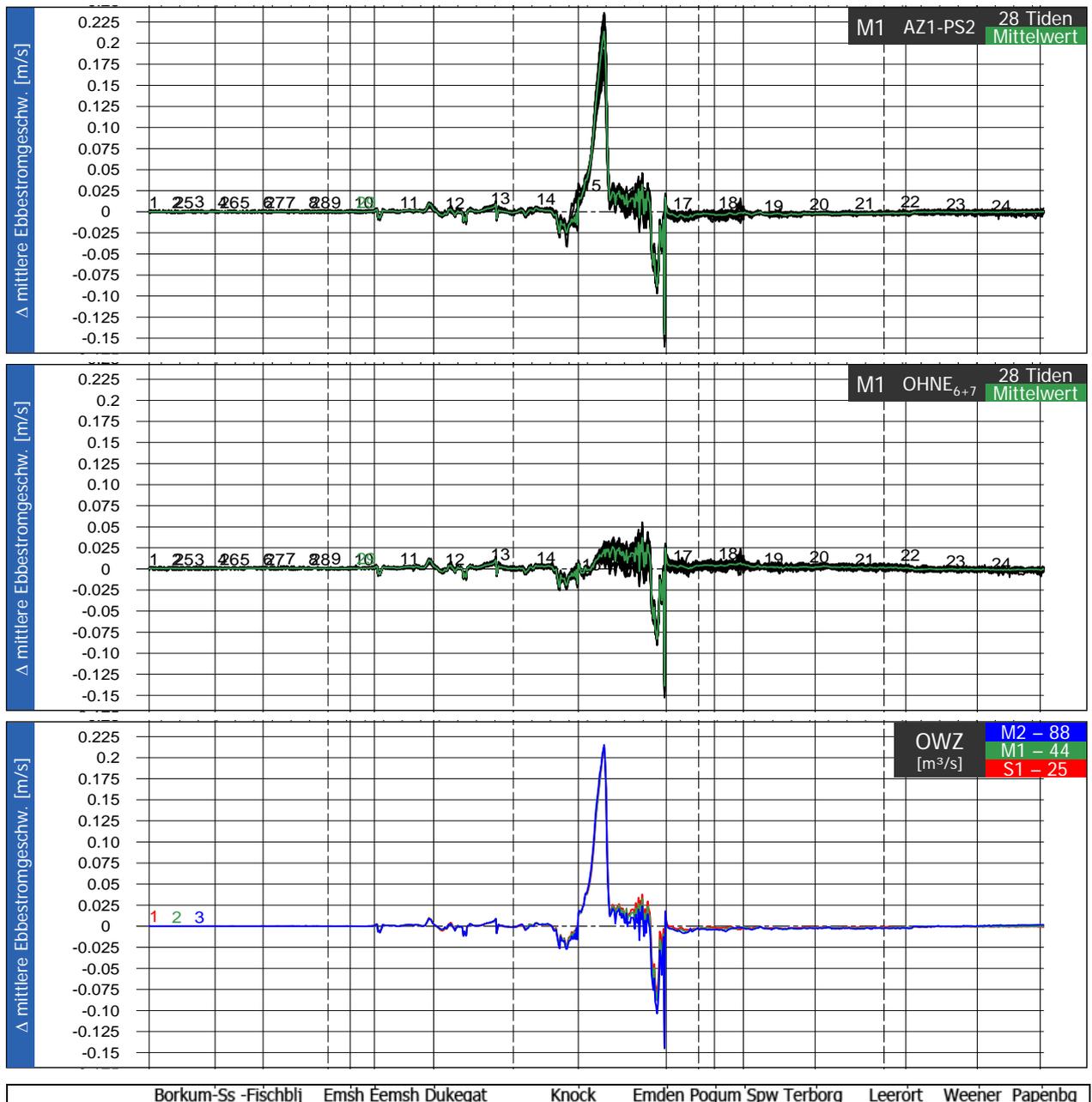


Bild 37: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Ebbestromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

Die flächenhafte Darstellung der mittleren Änderung der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zeigt, dass im Abschnitt wenige Kilometer stromauf und stromab von der Querschnittseinengung eine Konzentration der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fahrrinne stattfindet und im ufernahen Bereich im Strömungsschatten der Querschnittseinengung sich die Strömungsgeschwindigkeiten reduzieren. Die Verbreiterung der Fahrrinne zur Wendestelle führt lokal zu Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 38 und Bild 39).

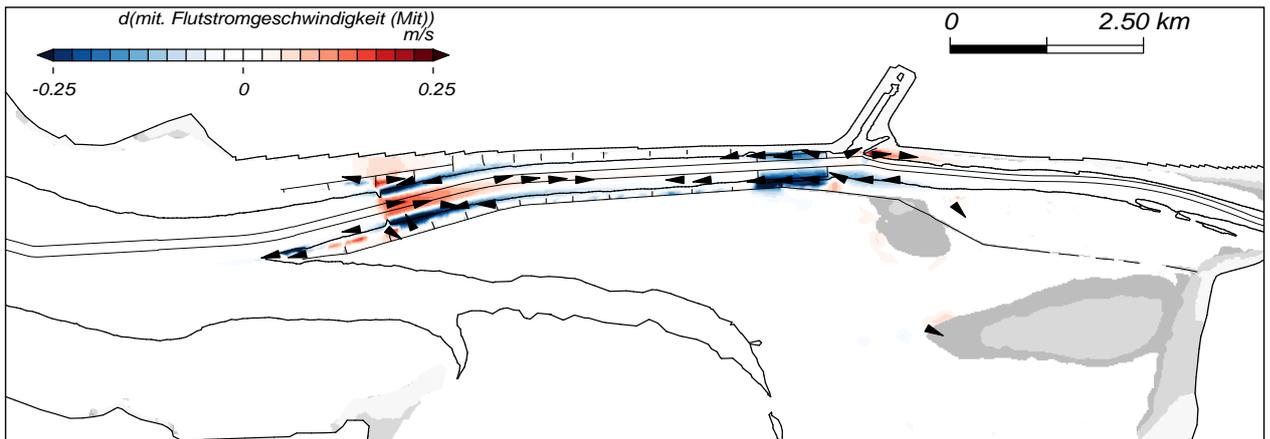


Bild 38: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Flutstromgeschwindigkeit zwischen Knock und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen des Betrags der Strömungsgeschwindigkeit in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbclassenbreite beträgt 2,5 cm/s und Änderungen kleiner als $\pm 2,5$ cm/s werden nicht dargestellt.

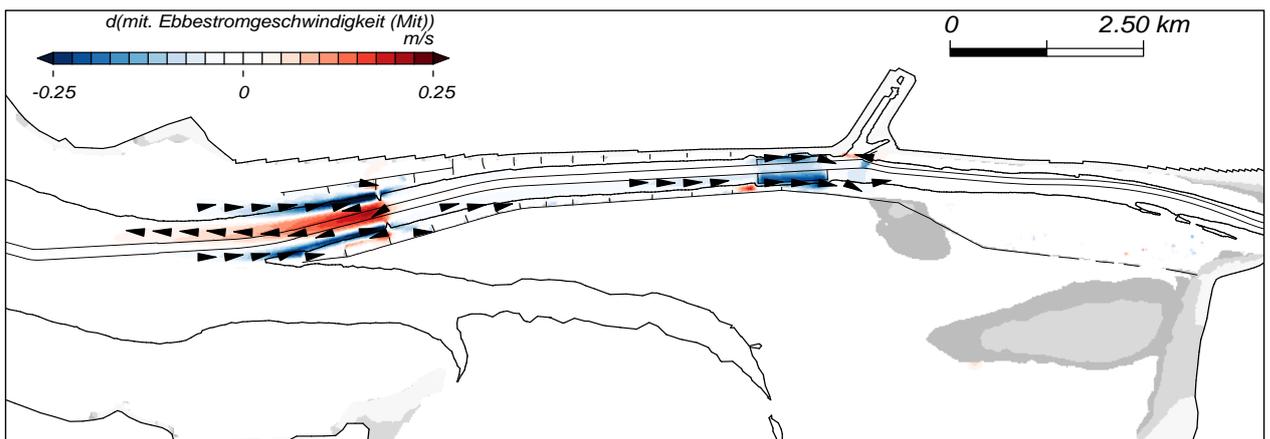
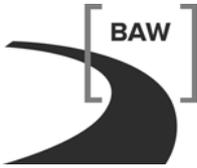
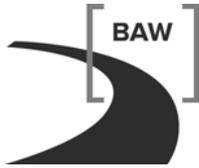


Bild 39: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Ebbestromgeschwindigkeit zwischen Knock und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen des Betrags der Strömungsgeschwindigkeit in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbclassenbreite beträgt 2,5 cm/s und Änderungen kleiner als $\pm 2,5$ cm/s werden nicht dargestellt.



Die Zunahme der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten auf Höhe der Querschnittseinengung kann lokal zu einer Eintiefung führen und damit die geplante Wirkung der Querschnittseinengung aufheben. Es ist deshalb notwendig, nach Herstellung der Querschnittseinengung die Entwicklung der Tiefen in diesem Abschnitt zu beobachten und ggf. eine Sohlsicherung zu verbauen. Eine Eintiefung um etwa einen halben Meter wird als unbedenklich eingestuft.



8 Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Salzverteilung

8.1 Theoretische Grundlagen

Die Vertiefung durch den geplanten Ausbau führt zu einem größeren Wasservolumen im Ems-Ästuar. Dieses zusätzliche Wasservolumen wird durch eine Mischung aus salzhaltigem Meerwasser und Oberwasser gefüllt. Vorausgesetzt, dass der Oberwasserzufluss unverändert bleibt, erhöht sich ausbaubedingt die Verweilzeit des Oberwassers. Ebenso werden ausbaubedingt die baroklinen Prozesse zum Transport des Salzes von der Nordsee in die Ems verändert.

Des Weiteren ist die ausbaubedingte Veränderung des Salzgehalts auch eine Reaktion auf die ausbaubedingten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Mit der Strömung wird Salz transportiert und Veränderungen der Strömung führen zu Veränderungen im Salztransport:

- Erhöhen sich die Flutstromgeschwindigkeiten, dann verlängern sich entsprechend die Flutstrom-Transportwege für die Salzfracht, Salz kommt weiter nach stromauf und der mittlere und maximale Salzgehalt werden angehoben.
- Nehmen die Flutstromgeschwindigkeiten ab, dann verkürzen sich entsprechend die Flutstrom-Transportwege für die Salzfracht, Salz kommt nicht mehr so weit nach stromauf und der mittlere und maximale Salzgehalt nehmen ab.
- Erhöhen sich die Ebbestromgeschwindigkeiten, dann verlängern sich entsprechend die Ebbestrom-Transportwege für die Salzfracht, salzarmes Wasser wird weiter nach stromab transportiert und der mittlere und minimale Salzgehalt nehmen ab.
- Nehmen die Ebbestromgeschwindigkeiten ab, dann verkürzen sich entsprechend die Ebbestrom-Transportwege für die Salzfracht, salzarmes Wasser wird nicht mehr so weit nach stromab transportiert und der mittlere und minimale Salzgehalt werden angehoben.

Dazu reicht es nicht aus, die Flut- und Ebbestrom-Transportwege für jeden Ort entlang des Ästuars als zeitliches Integral der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten ($\int v dt$) zu betrachten. Bei dieser nach Euler² benannten Betrachtung ändern sich Flut- und Ebbestromwege nur an den Orten, wo sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten ändern. Statt dessen gilt es auch zu berücksichtigen, dass sich für ein beliebiges Salzpaket auf dem Flut- oder Ebbeweg nach stromauf, bzw. stromab auch der Ort während der Flut- oder Ebbephase ändert. Diese doppelte Änderung, also die Änderung von Ort und Zeit während der zeitlichen Integration

² Leonhard Euler (1707 – 1783)

der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten wird nach Lagrange³ benannt. Wird diese Betrachtung berücksichtigt, dann ändert sich der Flut- oder Ebbestromweg immer dann, wenn sich unterwegs zwischen Start- und Endpunkt der Flut-, bzw. Ebbeperiode die Strömungsgeschwindigkeiten ändern. Die oben herausgestellten Punkte können also wie folgt präzisiert werden:

- Führt ein geplanter Ausbau zu einer abschnittswisen Zunahme der Flutstromgeschwindigkeiten, dann werden die Flutstrom-Transportwege derjenigen Salzpakete weiter Richtung stromauf verlängert, die stromab oder im Abschnitt des Ausbaus die Flutphase beginnen. Der maximale und mittlere Salzgehalt nimmt im Ausbau-Abschnitt und stromauf zu.
- Führt ein geplanter Ausbau zu einer abschnittswisen Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten, dann werden die Flutstrom-Transportwege derjenigen Salzpakete Richtung stromauf verkürzt, die stromab oder im Abschnitt des Ausbaus die Flutphase beginnen. Der maximale und mittlere Salzgehalt nimmt im Ausbau-Abschnitt und stromauf ab.
- Führt ein geplanter Ausbau zu einer abschnittswisen Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeiten, dann werden die Ebbestrom-Transportwege derjenigen Salzpakete weiter Richtung stromab verlängert, die stromauf oder im Abschnitt des Ausbaus die Ebbeperiode beginnen. Der minimale und mittlere Salzgehalt nimmt im Ausbau-Abschnitt und stromab ab.
- Führt ein geplanter Ausbau zu einer abschnittswisen Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeiten, dann werden die Ebbestrom-Transportwege derjenigen Salzpakete Richtung stromab verkürzt, die stromauf oder im Abschnitt des Ausbaus die Ebbeperiode beginnen. Der minimale und mittlere Salzgehalt nimmt im Ausbau-Abschnitt und stromab zu.

Daraus lässt sich bereits eine Asymmetrie der ausbaubedingten Änderungen für den Salzgehalt erkennen: Änderungen der Flutstromgeschwindigkeiten beeinflussen zuerst den maximalen Salzgehalt, deshalb finden sich ausbaubedingte Änderungen des maximalen Salzgehalts eher stromauf vom Ausbau-Abschnitt. Änderungen der Ebbestromgeschwindigkeiten beeinflussen zuerst den minimalen Salzgehalt, deshalb finden sich ausbaubedingte Änderungen des minimalen Salzgehalts eher stromab vom Ausbau-Abschnitt.

In der vorliegenden Untersuchung sind die ausbaubedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit sehr komplex:

- Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten nehmen sowohl abschnittsweise zu (im Bereich der Querschnittseinengung) als auch ab (im Bereich der Wendestelle und im Übergang zur Unterems).
- Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten nehmen nicht mit gleicher Intensität zu, bzw. ab.

³ Joseph-Louis Lagrange (1736 – 1813)

- Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten nehmen nicht am gleichen Ort zu (Querschnittseinengung: Zunahmen der Flutstromgeschwindigkeiten stromauf von der Querschnittseinengung und Zunahmen der Ebbestromgeschwindigkeiten stromab von der Querschnittseinengung)
- Die Querschnittseinengung führt zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne und zugleich zu einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten im Böschungsbereich im Strömungsschatten der verlängerten Buhnen. Zusätzlich nimmt der horizontale Salzgehaltsgradient von der Fahrrinne zur Böschung ausbaubedingt zu, entsprechend nehmen diffusive Austauschprozesse zu.
- Ändert sich der minimale Salzgehalt an einem Ort im Ästuar, z.B. im Ausbau-Abschnitt, dann ändert sich ebenfalls der maximale Salzgehalt am anderen Ende des lagrange-schen Flutstromweges, also stromauf vom Ausbau-Abschnitt. Auch dann, wenn sich die Flutstromgeschwindigkeiten auf diesem Weg nicht ändern. So können die ausbaubedingten Änderungen des maximalen Salzgehalts letztlich bis zum oberstromseitigen Ende der Brackwasserzone reichen.
- Ändert sich der maximale Salzgehalt an einem Ort im Ästuar, z.B. im Ausbau-Abschnitt, dann ändert sich ebenfalls der minimale Salzgehalt am anderen Ende des lagrange-schen Ebbestromweges, also stromab vom Ausbau-Abschnitt. Auch dann, wenn sich die Ebbestromgeschwindigkeiten auf diesem Weg nicht ändern. So können die ausbaubedingten Änderungen des minimalen Salzgehalts letztlich bis zum Übergang des Ems-Ästuars in die Nordsee reichen.

8.2 Wirkung des Ausbaus auf den minimalen Salzgehalt

Der minimale Salzgehalt wird im Emden Fahrwasser und in der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone zunehmen. Die Zunahme hat im Emden Fahrwasser ihr Maximum mit im Mittel +0,8 PSU und resultiert aus der Verkürzung der lagrange-schen Ebbestromwege, weil die Ebbestromgeschwindigkeit zwischen Emden Fahrwasser und stromauf durch Wendestelle und Übergang zur Unterems abnimmt (Bild 40, oben).

Weiter stromauf (in der Unterems) resultiert die Zunahme aus der Zunahme des maximalen Salzgehalts am Anfangspunkt der lagrange-schen Ebbestromwege für diesen Abschnitt. Die Zunahme des minimalen Salzgehalts klingt nach stromauf bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone ab. Je niedriger der Oberwasserzufluss, desto weiter nach stromauf ist die oberstromseitige Grenze der Brackwasserzone verschoben. Entsprechend verlagern sich mit abnehmendem Oberwasserzufluss die ausbaubedingten Änderungen nach Oberstrom. Zwischen Emssperrwerk und Terborg klingen die Zunahmen des minimalen Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab (Bild 40, unten).

Seewärts der Querschnittseinengung nimmt die Ebbestromgeschwindigkeit ausbaubedingt zu, so dass ab der Querschnittseinengung nach Unterstrom die Verkürzung der lagrange-

schen Ebbestromwege kompensiert wird, die Zunahme des minimalen Salzgehalts reduziert wird bis hin zu einer Abnahme des minimalen Salzgehalts auf Höhe Knock um etwa 0,3 PSU im Mittel. Dies ist ein Resultat der Querschnittseinengung, wie auch der Vergleich mit und ohne Querschnittseinengung zeigt (Bild 40, oben und Bild 40, Mitte). Ebenfalls bedingt durch die Querschnittseinengung steigt die Zunahme des minimalen Salzgehalts im Emden Fahrwasser an.



Bild 40: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten minimalen Salzgehalts in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

Seewärts von Emden hat der Oberwasserzufluss nur einen geringen Einfluss auf die ausbaubedingten Änderungen des minimalen Salzgehalts (Bild 40, unten).

Zwischen Knock und Dukegat klingen die Abnahmen des minimalen Salzgehalts betragsmäßig auf einen Wert unter 0,1 PSU ab. Im Dollart sind Zunahmen des minimalen Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, im Dollartmund bedingt durch eine veränderte Zirkulation über den Geiseleiddamm bis zu 0,4 PSU (Bild 41).

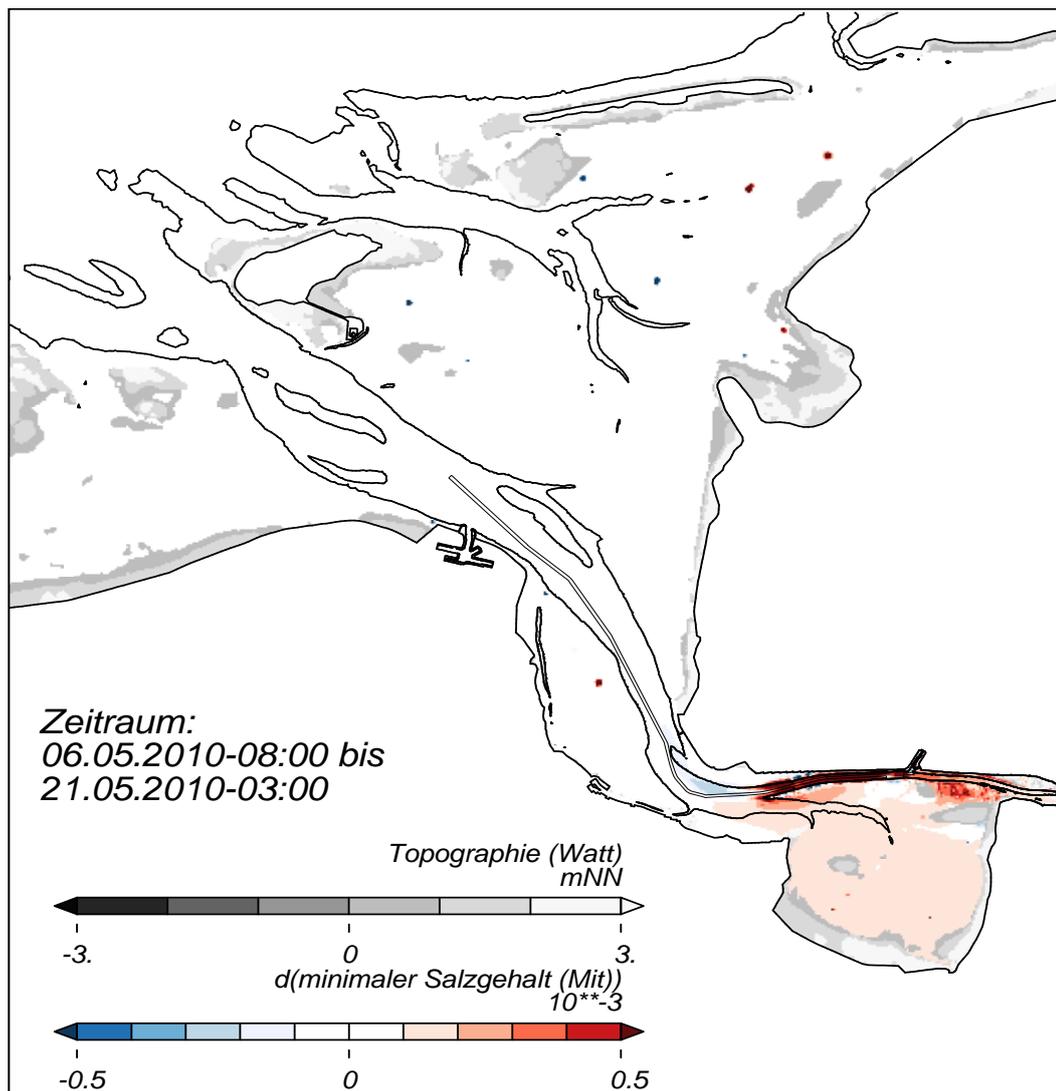


Bild 41: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten minimalen Salzgehalts zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen des minimalen Salzgehalts in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 PSU und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ PSU werden nicht dargestellt.

8.3 Wirkung des Ausbaus auf den maximalen Salzgehalt

In der Unterems nimmt der maximale Salzgehalt ab Pogum zu. Dies ist zu einem Teil zu erklären, weil die Flutstromgeschwindigkeiten ausbaubedingt zwischen Emden und Pogum geringfügig zunehmen. Zusätzlich ist im Abschnitt zwischen Emden Fahrwasser und Pogum der minimale Salzgehalt ausbaubedingt angehoben. Ein Salzpaket, das sich von hier mit beginnender Flut nach stromauf in Bewegung setzt, besitzt ausbaubedingt einen höheren Salzgehalt und führt zu einer Zunahme des maximalen Salzgehalts am Endpunkt des lagrangeschen Flutstromweges (Bild 42, oben).

Die Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems hat ihr Maximum von im Mittel 0,4 PSU zwischen dem Emssperrwerk und Terborg, in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss. Die Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems klingt nach stromauf bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone ab. Je niedriger der Oberwasserzufluss, desto weiter nach stromauf ist die oberstromseitige Grenze der Brackwasserzone verschoben. Entsprechend verlagern sich mit abnehmendem Oberwasserzufluss die ausbaubedingten Änderungen nach Oberstrom. Zwischen Terborg und Leerort klingen die Zunahmen des maximalen Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab (Bild 42, unten).

Der Vergleich mit und ohne Querschnittseinengung zeigt, dass die Querschnittseinengung auf die ausbaubedingten Änderungen des maximalen Salzgehalts ab Terborg und stromauf praktisch keinen Einfluss hat (Bild 42, oben und Bild 42, Mitte).

Im Emden Fahrwasser nimmt der maximale Salzgehalt um 0,1 PSU bis 0,2 PSU ab. Diese Änderung ist direkt mit der Querschnittseinengung verknüpft, wie ein Vergleich der ausbaubedingten Änderungen mit und ohne Querschnittseinengung zeigt (Bild 42, oben und Bild 42, Mitte). Die Querschnittseinengung führt zu einer Zunahme der Flutstromgeschwindigkeiten, entsprechend wären auch Zunahmen des maximalen Salzgehalts im Emden Fahrwasser zu erwarten. Dieser Effekt wird aber kompensiert durch eine veränderte Überströmung des Geiseleitdamms und damit verbunden ein veränderter Salz-Austausch vom Dollart in das Emden Fahrwasser. Dies belegt die flächenhafte Darstellung der ausbaubedingten Änderungen des maximalen Salzgehalts durch deutliche Abnahmen nördlich und südlich des Geiseleitdamms zwischen Emden und Geisespitze (Bild 44). Dies wird auch dadurch belegt, dass die Querschnittseinengung die Wasserstände im Emden Fahrwasser verändert und dass der maximale Salzgehalt immer zum Zeitpunkt der Flutstromkenterung kurz nach Tidehochwasser auftritt, also in einer Tidephase, in der ein Austausch zwischen Dollart und Emden Fahrwasser stattfindet.

Seewärts vom Emssperrwerk hat der Oberwasserzufluss nur einen geringen Einfluss auf die ausbaubedingten Änderungen des maximalen Salzgehalts (Bild 42, unten).

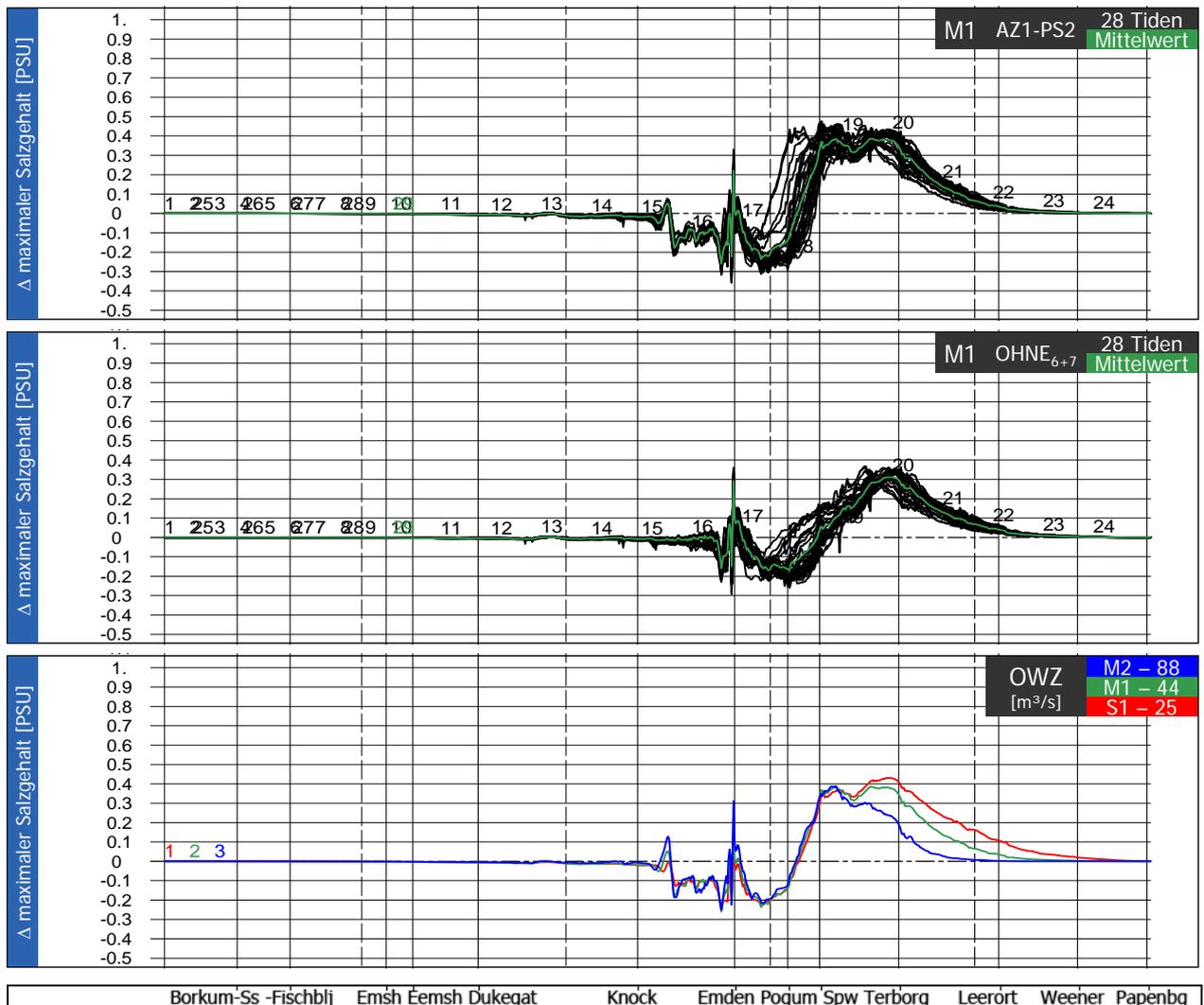


Bild 42: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten maximalen Salzgehalts in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

Bei geringem Oberwasserzufluss kann Salz mit dem Flutstrom bis in die Leda gelangen. Entsprechend wird unter diesen Bedingungen der Salzgehalt in der Leda ausbaubedingt zunehmen.

Die durchgeführten Untersuchungen und hier insbesondere das Szenario S1 zeigen, dass die ausbaubedingte Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Leda auch bei niedrigem Oberwasserzufluss weniger als 0,1 PSU beträgt (Bild 43). Die ausbaubedingte Zunahme des mittleren und minimalen Salzgehalts fällt so weit Oberstrom vergleichsweise niedriger aus, weil zumindest in Tidephasen um Kenterung des Ebbestroms der Salzgehalt nur vom Oberwasserzufluss abhängig ist und sich deshalb nicht ausbaubedingt ändern kann.

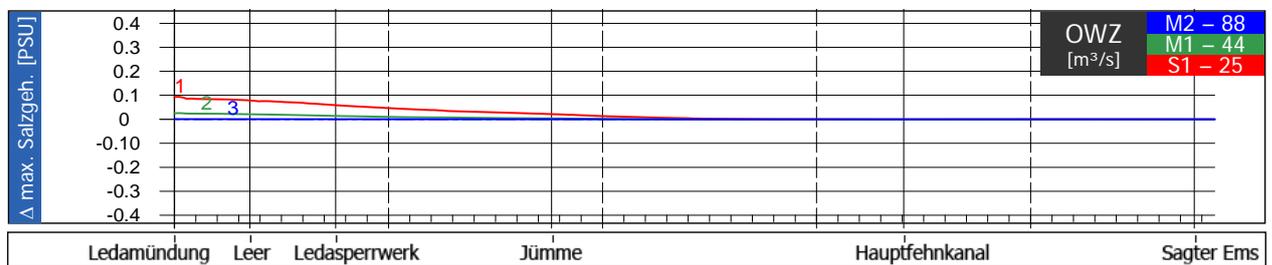


Bild 43: Ausbaubedingte mittlere Änderung des tiefengemittelten maximalen Salzgehalts in der Leda in Flussmitte zwischen der Mündung in die Ems und der Einmündung des Elisabethfehnkanals in die Sagter Ems für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot).

Seewärts vom Emdener Fahrwasser sind keine Änderungen des maximalen Salzgehalts zu erwarten, die dem Betrag nach größer als 0,1 PSU sind. Im Dollart sind Zunahmen des maximalen Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, die zum Dollartmund hin abnehmen (Bild 44).

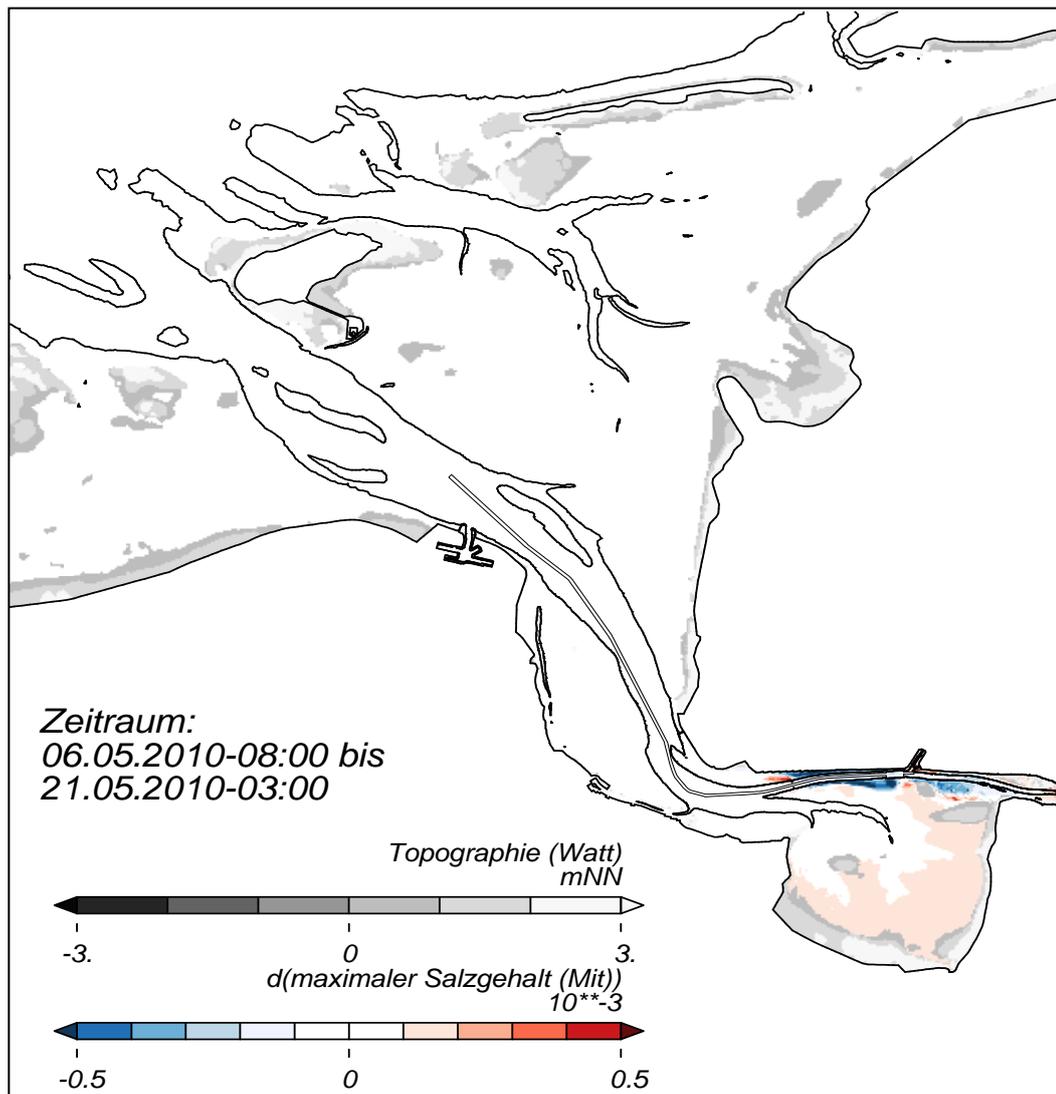


Bild 44: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten maximalen Salzgehalts zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen des maximalen Salzgehalts in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 PSU und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ PSU werden nicht dargestellt.

8.4 Wirkung des Ausbaus auf den mittleren Salzgehalt

Der minimale und der maximale Salzgehalt treten jeweils im Verlauf einer Tide zu einem bestimmten Zeitpunkt auf. Der minimale Salzgehalt etwa bei Stromkenterung nach Ebbe und der maximale Salzgehalt etwa bei Stromkenterung nach Flut. Im Gegensatz dazu wird der mittlere Salzgehalt als der über eine Tide gemittelte Salzgehalt verstanden und ist also keinem bestimmten Zeitpunkt zuzuordnen. Somit ist eine ausbaubedingte Veränderung des mittleren Salzgehalts ein Maß für die mittlere Veränderung der Salzgehaltsverteilung im Ems-Ästuar.

Bedingt durch den Ausbau wird der mittlere Salzgehalt im Emden Fahrwasser und in der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone angehoben (Bild 45, oben). Zwischen Emssperrwerk und Leerort klingen die Zunahmen des mittleren Salzgehalts auf einen Wert unter 0,1 PSU ab (Bild 45, unten). Nur in einem kurzen Abschnitt zwischen der Querschnittseinengung und Knock reduziert sich der mittlere Salzgehalt geringfügig. Die Querschnittseinengung verursacht diese Abnahme, wie ein Vergleich mit und ohne Querschnittseinengung zeigt (Bild 45, oben und Bild 45, Mitte).

Die Höhe der Zunahmen für den mittleren Salzgehalt sind abhängig vom Oberwasserzufluss: Mit abnehmendem Oberwasserzufluss verschieben sich die Zunahmen nach Oberstrom. Auf Höhe des Emssperrwerkes ist das Maximum der Zunahmen für die Unterems zu finden. Das Maximum der Zunahmen liegt im Mittel zwischen 0,2 PSU (mittlerer Oberwasserzufluss) und 0,3 PSU (niedriger Oberwasserzufluss). Im Emden Fahrwasser dagegen werden die Zunahmen mit abnehmendem Oberwasserzufluss immer kleiner. Bei mittlerem Oberwasserzufluss betragen die Zunahmen im Mittel bis zu 0,3 PSU, überschreiten aber bei niedrigem Oberwasserzufluss nur nahe der Wendestelle den Schwellenwert von +0,1 PSU (Bild 45, unten).

Seewärts von Knock sind keine Änderungen des mittleren Salzgehalts zu erwarten, die dem Betrag nach größer als 0,1 PSU sind. Im Dollart sind Zunahmen des mittleren Salzgehalts zwischen 0,1 PSU und 0,2 PSU zu erwarten, die zum Dollartmund hin abnehmen (Bild 46).

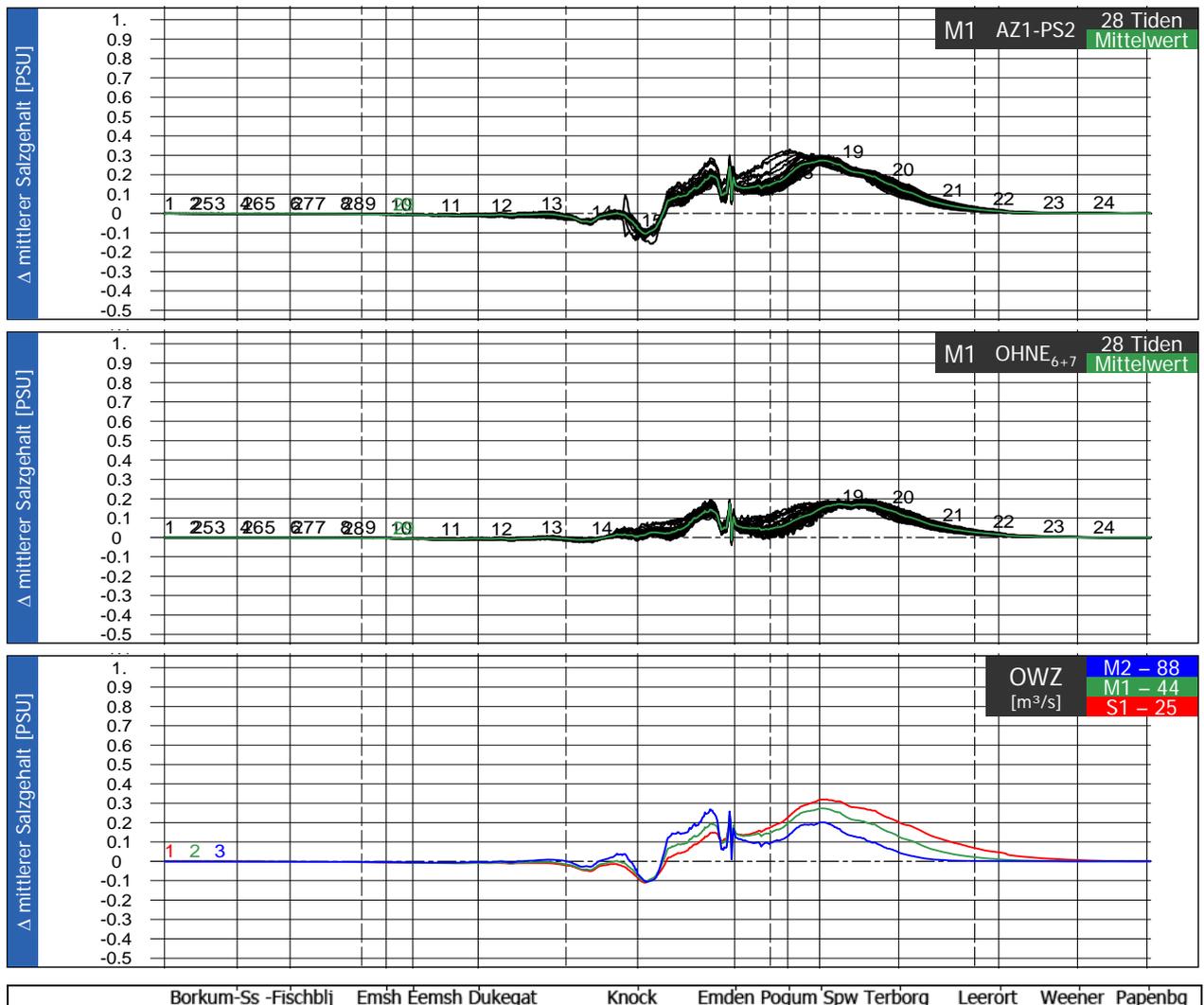


Bild 45: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten mittleren Salzgehalts in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

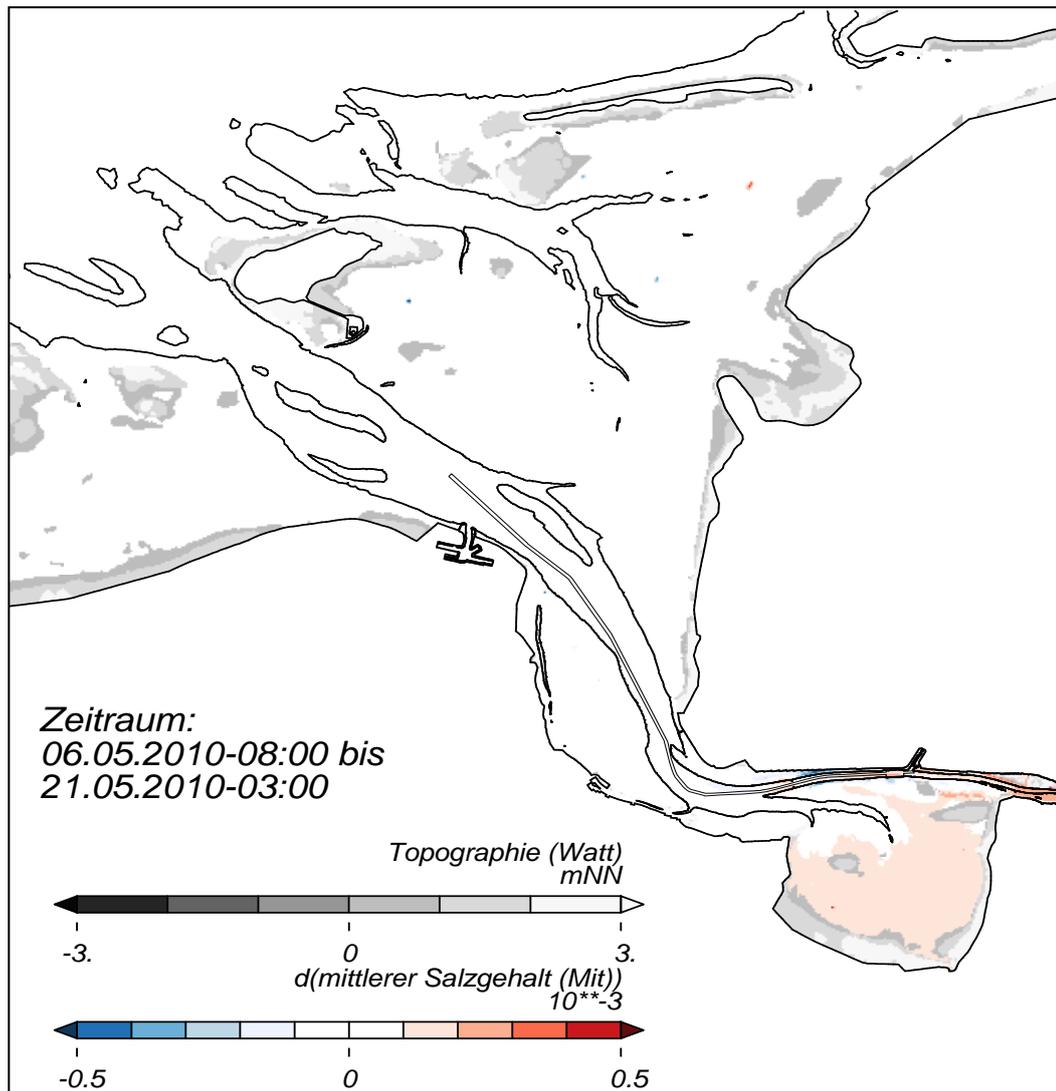
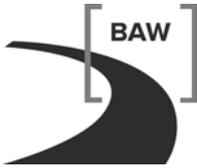


Bild 46: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten mittleren Salzgehalts zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen des mittleren Salzgehalts in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 PSU und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ PSU werden nicht dargestellt.

8.5 Horizontale Verlagerung der Brackwasserzone

Die ausbaubedingte Zunahme des minimalen, mittleren und maximalen Salzgehalts in der Unterems lässt sich auch als eine Verlagerung der Brackwasserzone nach Oberstrom deuten. Die Brackwasserzone bewegt sich mit der Flut nach Oberstrom und mit der Ebbe zurück in Richtung Nordsee. Die maximale Ausdehnung in Richtung Oberstrom hat die Brackwasserzone etwa zum Zeitpunkt der Flutstromkenterung, wenn auch der Salzgehalt innerhalb einer Tide für einen beliebigen Ort das Maximum annimmt. Im weiteren Verlauf wird die



ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone bei maximaler Ausdehnung der Brackwasserzone ermittelt. Deshalb wird dazu die ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehalts verwendet.

Die ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehalts für einen beliebigen Ort in der Unterems bedeutet, dass für diesen Ort bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen im Ausbauzustand ein höherer maximaler Salzgehalt auftritt, als im Vergleichszustand. Unter der Annahme, dass der Salzgehalt von der Nordsee in Richtung Oberstrom streng monoton abnimmt, bedeutet dies, dass der maximale Salzgehalt, der im Ausbauzustand bis zu diesem Ort gelangt, im Vergleichszustand ein gewisses Stück weniger weit in Richtung Oberstrom kommt. Diese Wegdifferenz gilt es im Folgenden für verschiedene Isohalinen zu ermitteln.

Als Eingangsdaten für diese Analyse werden die über 28 Tiden gemittelten querprofilintegrierten maximalen Salzgehalte verwendet, um sowohl die Änderungen des maximalen Salzgehalts in der Fahrrinne als außerhalb der Fahrrinne zu berücksichtigen. Die Querprofile in der Unterems sind alle 500 m definiert (s. Bild 28). Zuerst wird für ausgewählte Isohalinen des maximalen Salzgehalts die Lage im Ems-Ästuar, getrennt für Vergleichs- und Ausbauzustand berechnet. Die Lage der Isohalinen wird zwischen den definierten Querprofilen mittels linearer Interpolation ermittelt und in Ems-Kilometern angegeben. Entsprechend besitzen die Berechnungen der Lage eine gewisse Ungenauigkeit. Im zweiten und letzten Schritt bildet die Differenz der Lagen für jede Isohaline die ausbaubedingte horizontale Verlagerung, wobei positive Werte als Verlagerung in Richtung Nordsee und negative Werte als Verlagerung in Richtung Oberstrom zu deuten sind.

Die oben angesprochenen gleichbleibenden äußeren Bedingungen werden über die in dieser Untersuchung definierten Szenarien erfüllt, so dass sich letztendlich für jede Isohaline dreimal eine Lage und eine horizontale Verlagerung berechnen lässt, getrennt für jedes Szenario S1, M1 und M2.

Tabelle 8 zeigt die ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone für die Isohalinen 3 PSU (Übergang oligohalin-mesohalin), 18 PSU (Übergang mesohalin-polyhalin) und 30 PSU (Übergang polyhalin-euhalin). Auffällig ist, dass alle Isohalinen nach stromauf verschoben werden, wenn sie sich stromauf vom Emssperrwerk befinden und nach stromab verschoben werden, wenn sie sich seewärts vom Emssperrwerk befinden.

Isohaline	Szenario	Lage im Vergleichszustand PS2	Lage im Ausbauzustand AZ1	Ausbaubedingte horizontale Verlagerung AZ1 – PS2	
3-PSU	S1	Ems-KM 11,74	Ems-KM 11,55	-190 m	< 500 m stromauf
	M1	Ems-KM 18,30	Ems-KM 18,20	-100 m	< 500 m stromauf
	M2	Ems-KM 24,46	Ems-KM 24,34	-120 m	< 500 m stromauf
18-PSU	S1	Ems-KM 27,77	Ems-KM 27,44	-330 m	< 500 m stromauf
	M1	Ems-KM 35,35	Ems-KM 35,45	+100 m	< 500 m stromab
	M2	Ems-KM 41,43	Ems-KM 41,49	+60 m	< 500 m stromab
30-PSU	S1	Ems-KM 68,85	Ems-KM 68,92	+70 m	< 500 m stromab
	M1	Ems-KM 81,00	Ems-KM 81,03	+30 m	< 500 m stromab
	M2	Ems-KM 82,48	Ems-KM 82,52	+40 m	< 500 m stromab

Tabelle 8: Ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone für die Isohalinen 3 PSU (Übergang oligohalin-mesohalin), 18 PSU (Übergang mesohalin-polyhalin) und 30 PSU (Übergang polyhalin-euhalin) auf der Basis der ausbaubedingten Änderung des querschnittsintegrierten maximalen Salzgehalts für die Szenarien S1 (niedriger Oberwasserzufluss), M1 (häufigster Oberwasserzufluss) und M2 (mittlerer Oberwasserzufluss). In der Spalte ganz rechts sind die Differenzen der interpolierten Lage der Isohalinen auf 500 m gerundet, um den Ungenauigkeiten bezüglich der Ausgangsdatenbasis Rechnung zu tragen.

Diese Analyse wurde für alle ganzzahligen Isohalinen zwischen 1 PSU und 30 PSU durchgeführt und grafisch über der Ems-Kilometrierung dargestellt (Bild 47). Die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone lässt sich grob in drei Bereiche unterteilen:

1. Seewärts von Knock: Die Brackwasserzone verschiebt sich um deutlich weniger als 500 m in Richtung See. Der Einfluss des Oberwasserzuflusses ist gering, aber mit der Tendenz zu höherer Verschiebung bei abnehmendem Oberwasserzufluss.
2. Zwischen Knock und Pogum: Die Brackwasserzone verschiebt sich um bis zu 1 km in Richtung See, allerdings in einem Fall (Szenario M2, Isohaline 21 PSU) um fast 0,5 km in Richtung Oberstrom. Insgesamt ist hier eine hohe Varianz der Daten erkennbar.
3. Zwischen Pogum und Papenburg: Die Brackwasserzone verschiebt sich in Richtung Oberstrom. Im Abschnitt Pogum bis Jemgum zwischen 0,2 km und 0,7 km. Weiter stromauf klingt die horizontale Verlagerung langsam bis auf Null ab. Mit abnehmendem Oberwasserzufluss reicht die oberstromseitige Grenze der Brackwasserzone weiter nach stromauf, entsprechend klingt die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone weiter stromauf auf Null ab.

Die auffälligste Erkenntnis: Die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone ist deutlich abhängiger vom Ort der Isohaline als vom Wert der Isohaline. Wichtig ist also zuerst, wo sich eine Isohaline in Ems-Kilometern ausgedrückt befindet, um die horizontale Verlagerung zu quantifizieren.

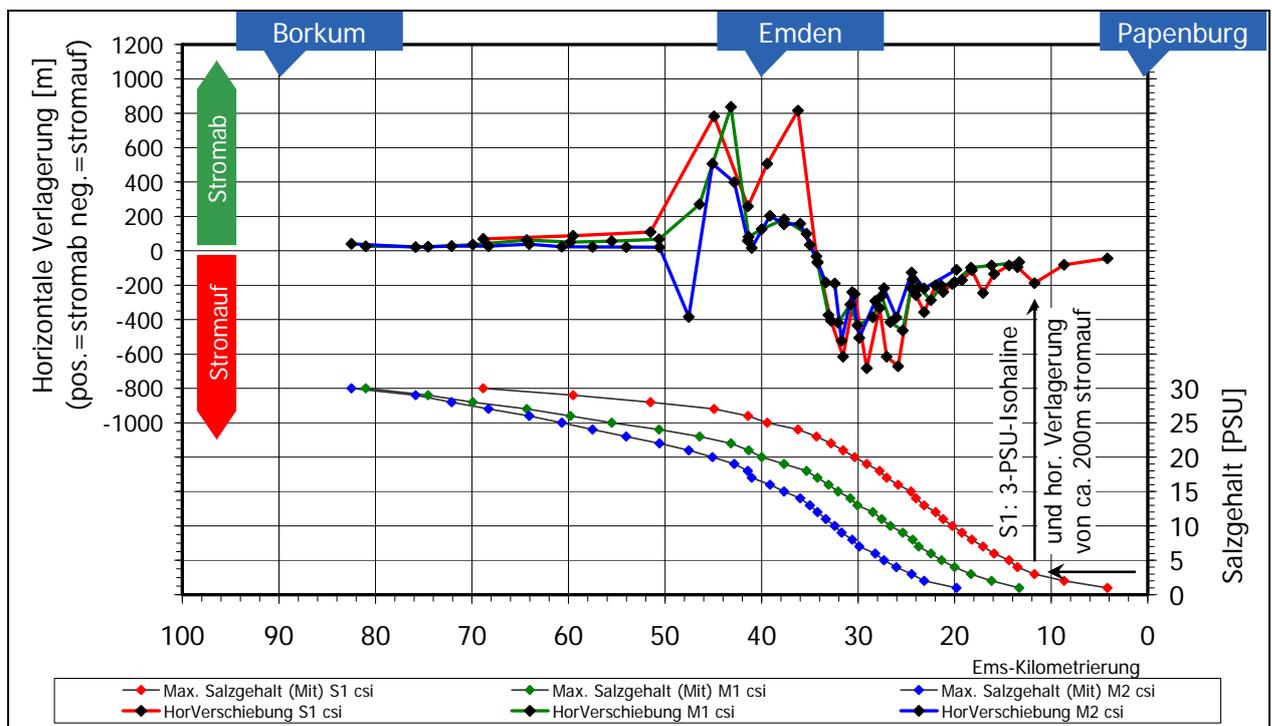
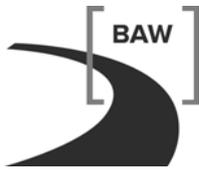


Bild 47: Horizontale Verlagerung der Brackwasserzone (oben) und querschnittintegrierter maximaler Salzgehalt für den planerischen Zustand PS2 (unten) für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot). Die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone ist für die Isohalinen 1 PSU bis 30 PSU mit einer Schrittweite von 1 PSU berechnet worden. Rechts ist zum besseren Verständnis mit zwei Pfeilen für die 3-PSU-Isohaline für Szenario S1 die Bestimmung der horizontalen Verlagerung hervorgehoben.



9 Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Schwebstoff-Haushalt

9.1 Beschreibung des Vergleichszustands PS2

Im Vergleichszustand PS2 zeigt sich der berechnete tiefengemittelte maximale und mittlere Schwebstoffgehalt entlang der Fahrrinnenmitte wie in Bild 48 dargestellt. In der Außenems ist der Schwebstoffgehalt erheblich geringer als im Emdener Fahrwasser und in der Unterems. Er steigt ab Knock deutlich an und erreicht zwischen Terborg und Leerort sein Maximum (zwischen 4 und 5 g/l im Maximum und zwischen 2 und 3 g/l im Mittel). Es bildet sich im Modell kein ausgeprägtes Trübungsmaximum nahe der oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone, sondern der Abschnitt Unterems und Dortmund-Ems-Kanal (DEK) ist vollständig eine Zone mit hoher Trübung.

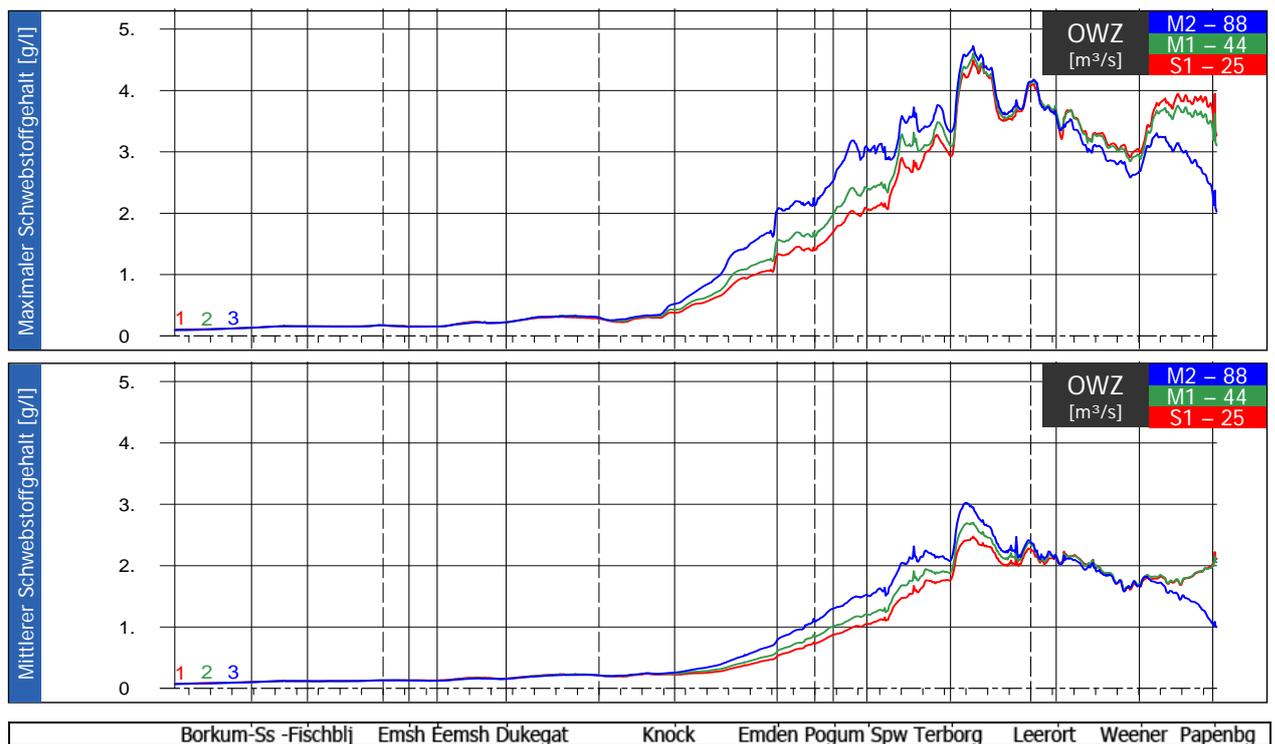


Bild 48: Absolutwerte des tiefen- und tidengemittelten maximalen Schwebstoffgehalts (oben) und mittleren Schwebstoffgehalts (unten) für Zustand PS2 in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot).

Mit zunehmendem Oberwasserzufluss verschiebt sich die Zone hoher Trübung in Richtung See, der Schwebstoffgehalt steigt seewärts von Leerort an und nimmt in Richtung Oberstrom ab. Insbesondere Szenario M2 (mittlerer Oberwasserzufluss) zeigt deutliche Abnahmen im Schwebstoffgehalt stromauf von Weener.

Bild 49 zeigt die advektiven Schwebstofftransporte für den Vergleichszustand PS2, getrennt für Flut- und Ebbestromtransport (oben und Mitte), sowie den residuellen (Netto-)Transport (unten) aufintegriert für alle Querprofile in der Außenems, im Emden Fahrwasser und in der Unterems (s.a. Bild 28).

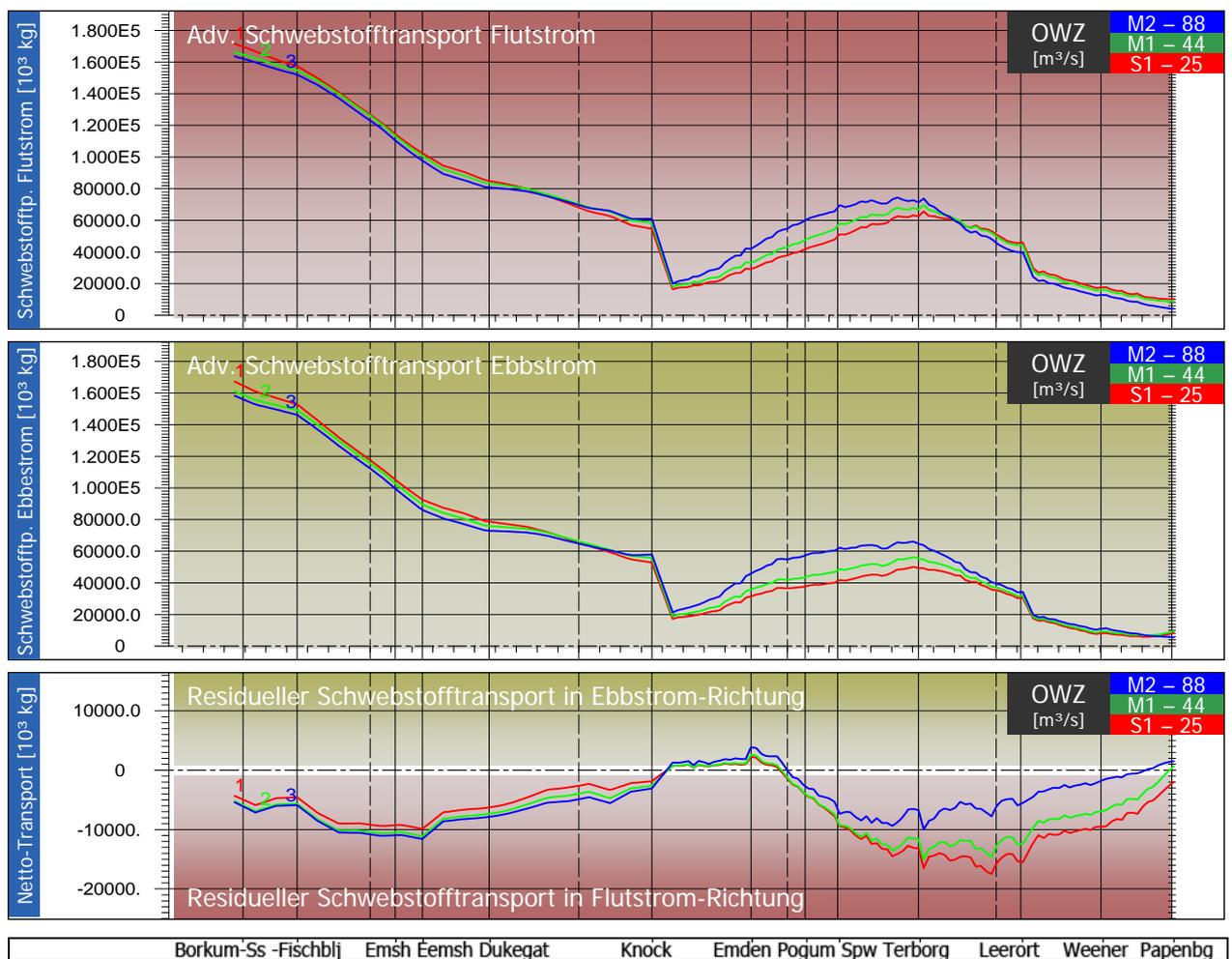


Bild 49: Absolutwerte des querschnittsintegrierten advektiven Schwebstofftransports je Tide für Zustand PS2 im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot). Oben für den advektiven Flutstrom-Schwebstofftransport. Mitte für den advektiven Ebbestrom-Schwebstofftransport. Unten für den residuellen (Netto-)Schwebstofftransport.

Die advektiven Flut- und Ebbstrom-Schwebstofftransporte sind nahe der Nordsee am Größten und nehmen bis Knock kontinuierlich ab. Weil weder der Schwebstoffgehalt noch die Strömungsgeschwindigkeit in der Außenems von See kommend kontinuierlich abnehmen, muss die abnehmende Querschnittsfläche der Querprofile die Ursache für die Abnahme des Transports sein. Vor dem Dollart spaltet sich der Transport in einen Dollart-Anteil und in einen Emden-Fahrwasser-Anteil auf. Stromauf von Knock wird nur der Transport im Emden Fahrwasser in der grafischen Darstellung berücksichtigt. Dieser Anteil beträgt etwa 1/3 des gesamten Transports auf Höhe Knock. Stromauf von Knock nimmt der Transport bis zwischen Emssperwerk und Terborg zu, weil der Schwebstoffgehalt schneller ansteigt als die Querschnittsfläche der Querprofile abnimmt. Der Schwebstoffgehalt steigt überproportional an. Stromauf von Terborg nimmt auch der Transport ab, weil die Querschnittsfläche weiter abnimmt und der Schwebstoffgehalt sein Maximum erreicht hat. Bei Leer spaltet sich der Transport nochmals auf in einen Leda- und einen Ems-Anteil auf. Beide Anteile sind etwa gleich groß. Stromauf der Ledamündung wird nur der Ems-Anteil dargestellt.

In der Unterems und im Emden Fahrwasser gibt es eine deutliche Variation des Transports bei variablem Oberwasserzufluss. Mit steigendem Oberwasserzufluss nimmt typischerweise auch der Transport zu. Aber es gibt eine Ausnahme: Der Flutstrom-Transport nimmt stromauf von Terborg mit abnehmendem Oberwasserzufluss zu. Erstens nehmen die maximale und die mittlere Flutstromgeschwindigkeit und die Flutstromdauer zu, je niedriger der Oberwasserzufluss ist, weil der der Flut entgegengesetzt gerichtete oberwasserabhängige Anteil des barotropen Druckgradienten mit abnehmendem Oberwasserzufluss abnimmt. Zweitens ist ab Leerort und stromauf der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt umso größer, je niedriger der Oberwasserzufluss ist. Beides führt zur Zunahme des Flutstrom-Transports mit abnehmendem Oberwasserzufluss und damit zum Tidal-Pumping.

In der Außenems ist der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf den Transport gering. Dies gilt für die Absolutwerte, aber insbesondere für den relativen Einfluss auf den Transport.

Die Differenz aus Ebbe- und Flutstromtransport ist der vorzeichenbehaftete residuelle oder Netto-Transport. Ein positiver residueller Transport ist in Richtung Nordsee gerichtet, ein negativer residueller Transport zeigt in Richtung Oberstrom. In der Außenems und in der Unterems zeigt der residuelle Transport nach Oberstrom, die Flut transportiert mehr Schwebstoffe nach Oberstrom als die Ebbe in Richtung Nordsee (Flut-Dominanz). In der Unterems ist eine deutliche Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss zu erkennen: Je höher der Oberwasserzufluss, desto geringer der residuelle Transport nach Oberstrom.

9.2 Wirkung des Ausbaus auf den Schwebstoffgehalt

In der Unterems, sowie im Emden Fahrwasser von Emden bis zwischen Wendestelle und Querschnittseinengung nehmen der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt ab. Dies ist zuerst auf die Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten im Bereich der Wendestelle zurückzuführen. Der Bereich der Wendestelle wirkt wie eine Senke für die Schwebstoffe (Bild 50, oben und Bild 51, oben).

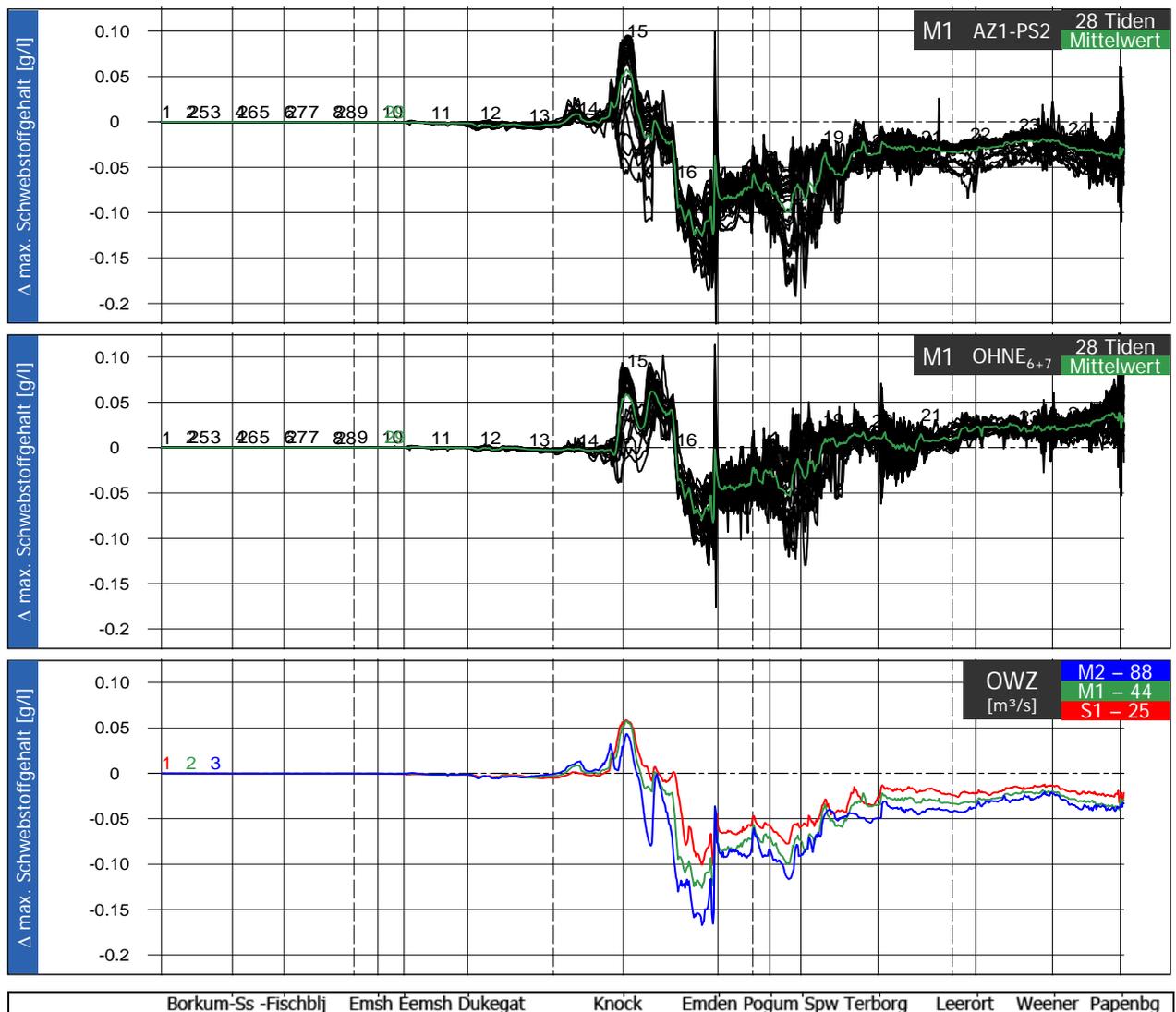


Bild 50: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten maximalen Schwebstoffgehalts in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

Die Wendestelle allein führt aber nicht zu einer Abnahme der Schwebstoffe in der gesamten Unterems. Der Vergleich mit den ausbaubedingten Änderungen ohne Berücksichtigung der Querschnittseinengung zeigt, dass der Einflussbereich der Schwebstoff-Abnahmen durch die Wendestelle zwischen Emssperrwerk und Terborg endet (Bild 50, Mitte und Bild 51, Mitte). Ohne die Berücksichtigung der Querschnittseinengung steigt der Schwebstoffgehalt weiter stromauf ausbaubedingt an, weil in der Unterems der Tidehub zunimmt (das Tideniedrigwasser sinkt ab), die Tide-Asymmetrie nimmt ebenfalls zu und die anfängliche Abnahme des Schwebstoffgehalts wird aufgezehrt und verkehrt sich weiter stromauf in eine Zunahme des Schwebstoffgehalts.

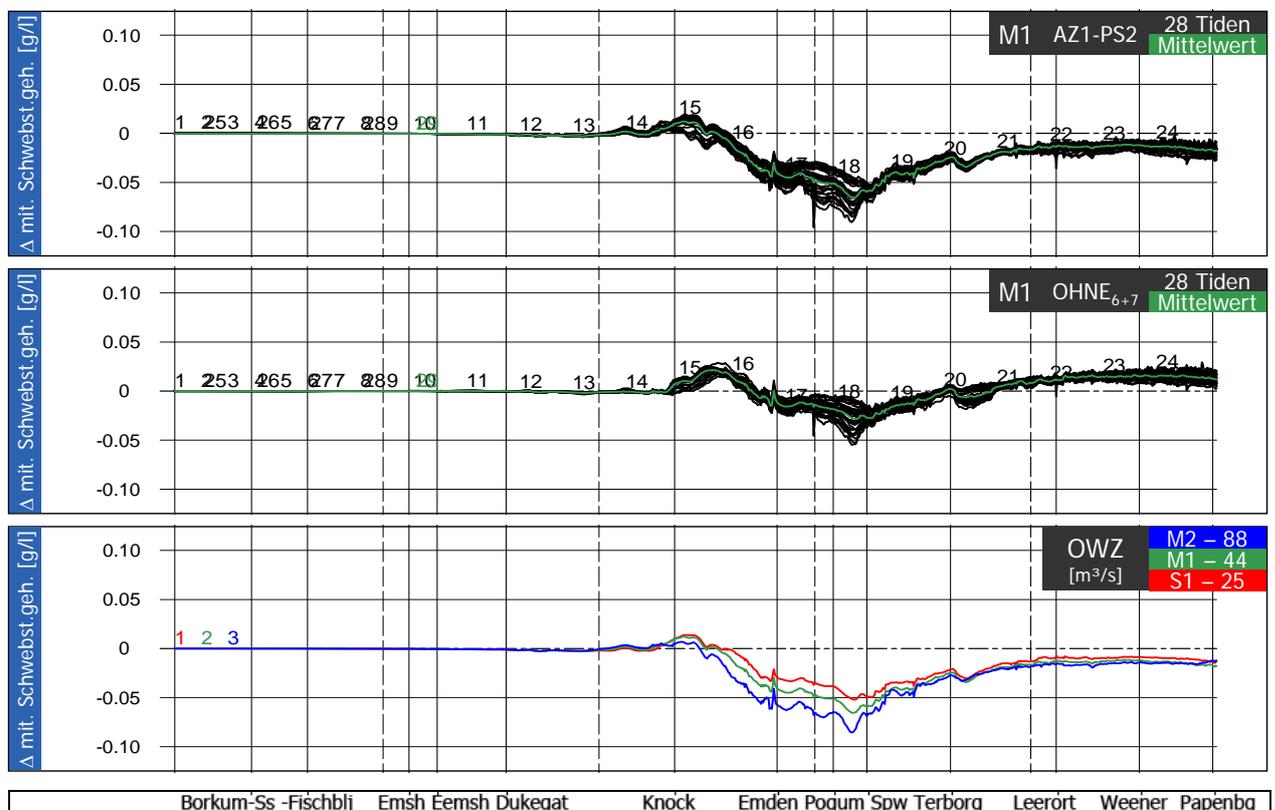


Bild 51: Ausbaubedingte Änderung des tiefengemittelten mittleren Schwebstoffgehalts in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg. Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün). Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung. Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

Mit der Querschnittseinengung nimmt der Tidehub in der Unterems ab (das Tideniedrigwasser steigt an), die Tide-Asymmetrie nimmt ab und die Abnahme des Schwebstoffgehalts erfolgt in der gesamten Unterems, im DEK bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet. Mit abnehmendem Oberwasserzufluss verringert sich die Abnahme des Schwebstoffgehalts in der Unterems und im Emdener Fahrwasser, weil die Wirkung der Querschnittseinengung auf die Tide (speziell die Zunahme des Tideniedrigwassers) ebenfalls mit abnehmendem Oberwasserzufluss abnimmt. Die Abnahme des Schwebstoffgehalts in der Unterems und im Emdener Fahrwasser bleibt aber qualitativ auch bei niedrigem Oberwasserzufluss erhalten (Bild 50, unten und Bild 51, unten).

Der Ausbau wird im Grundsatz die Situation hohen Schwebstoffgehalts in der Unterems nicht nennenswert verändern, dazu sind die ausbaubedingten Änderungen zu gering. Der Ausbau wirkt tendenziell reduzierend auf den Schwebstoffgehalt in der Unterems, d.h. die Änderungen sind so gering, dass sie messtechnisch nicht erfassbar sind.

9.3 Wirkung des Ausbaus auf den Schwebstofftransport

In der Außen- und Unterems werden sowohl der Flut-, als auch der Ebbe-Transport von Schwebstoffen verringert, weil erstens der Schwebstoffgehalt und zweitens der Tidehub ausbaubedingt abnehmen. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt wenige Kilometer stromauf und stromab von der Querschnittseinengung. Hier sind die Flut- bzw. die Ebbestromgeschwindigkeiten ausbaubedingt erhöht, entsprechend nehmen die Bodenschubspannungen, der Schwebstoffgehalt und in Folge auch der Flut- und Ebbestrom-Schwebstofftransport zu (Bild 52 und Bild 53, jeweils oben).

Im Vergleich mit den ausbaubedingten Änderungen ohne Berücksichtigung der Querschnittseinengung zeigt sich, dass ohne die Querschnittseinengung die Abnahme der Transporte nur bis etwa Terborg reicht. Dies ist die Reichweite der Wirkung der Verbreiterung der Fahrrinne zur Wendestelle (erhöhte Sedimentation) und damit verbunden die Reichweite der Reduzierung im Schwebstoffgehalt nach Oberstrom. Stromauf von Terborg nehmen Flut- und Ebbe-Transport zu, wenn die Querschnittseinengung unberücksichtigt bleibt. Nur mit Querschnittseinengung wird der Tidehub in der Unterems, im Leda-Jümme-Gebiet und im DEK bis Herbrum reduziert und in Folge dessen der Flut- und Ebbe-Transport von Schwebstoffen verringert (Bild 52 und Bild 53, jeweils Vergleich oben mit Mitte).

In Unterems wird die vorhandene Flut-Dominanz im Schwebstoff-Transport durch den Ausbau tendenziell verringert. Dies ist auf die Verbreiterung zur Wendestelle (erhöhte Sedimentation) und auf die Tidehub-Reduzierung und damit auf die Verringerung der Tide-Asymmetrie bedingt durch die Querschnittseinengung zurückzuführen (Bild 54, oben).

Die Wirkung der Wendestelle allein auf die Reduzierung der Flut-Dominanz reicht nach Oberstrom bis etwa zwischen Terborg und Leerort, mit der Querschnittseinengung grundsätzlich bis Herbrum, wobei die Reduzierung der Flut-Dominanz in Richtung oberstrom abnimmt (Bild 54, Vergleich oben mit Mitte).

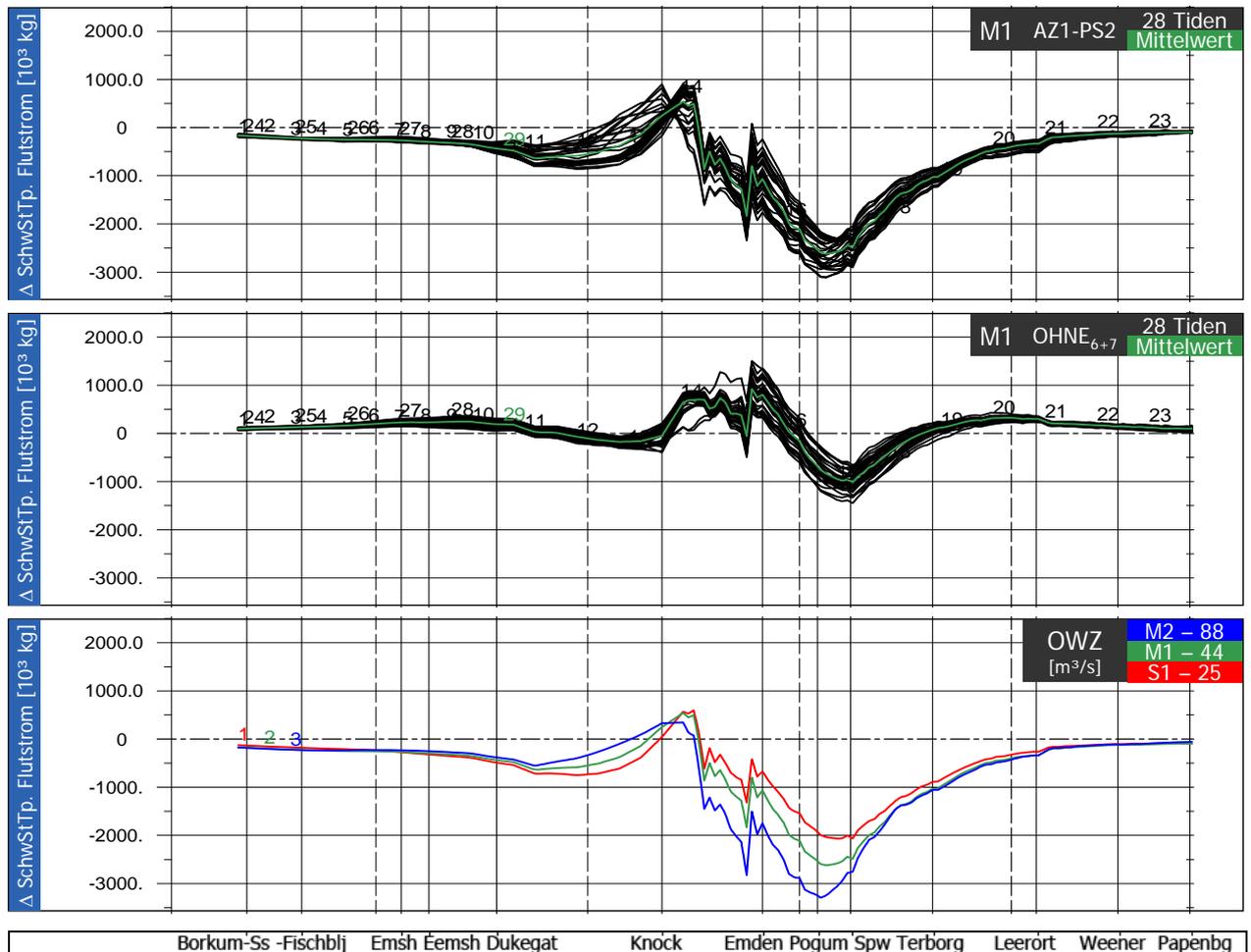


Bild 52: Ausbaubedingte Änderung des querschnittsintegrierten advektiven Flutstrom-Schwesstofftransports im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedrigster OWZ, rot)

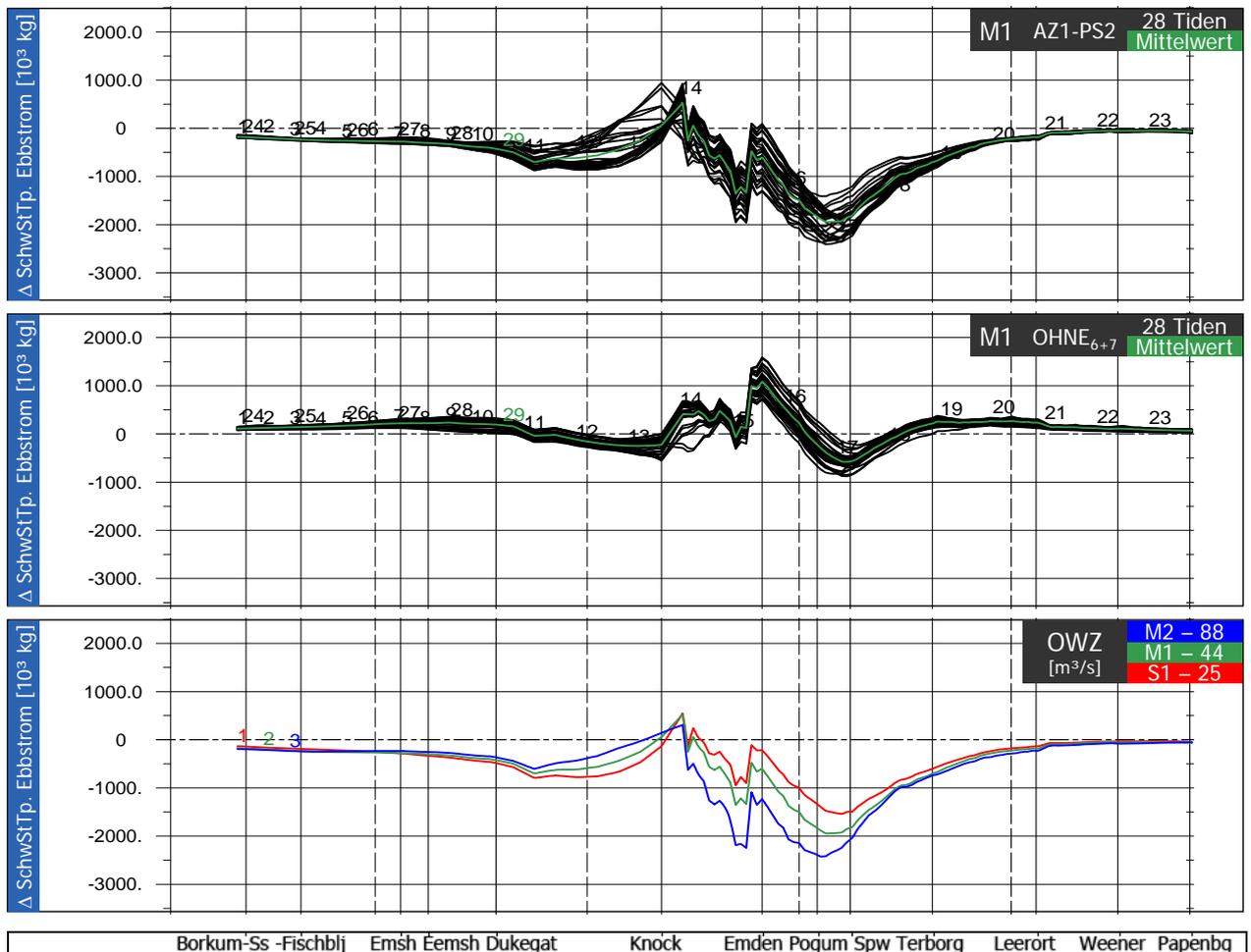


Bild 53: Ausbaubedingte Änderung des querschnittsintegrierten advektiven Ebbstrom-Schwesstofftransports im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

In der Unterems bleibt die ausbaubedingte Reduzierung der Flutdominanz des Netto-Schwesstofftransportes auch bei niedrigem Oberwasserzufluss qualitativ erhalten, sie schwächt sich jedoch mit abnehmendem Oberwasserzufluss deutlich ab. Das Maximum der ausbaubedingten Reduzierung reduziert sich im Vergleich zwischen dem maximalen und minimalen untersuchten Oberwasserzufluss um ca. 30% (Bild 54, unten).

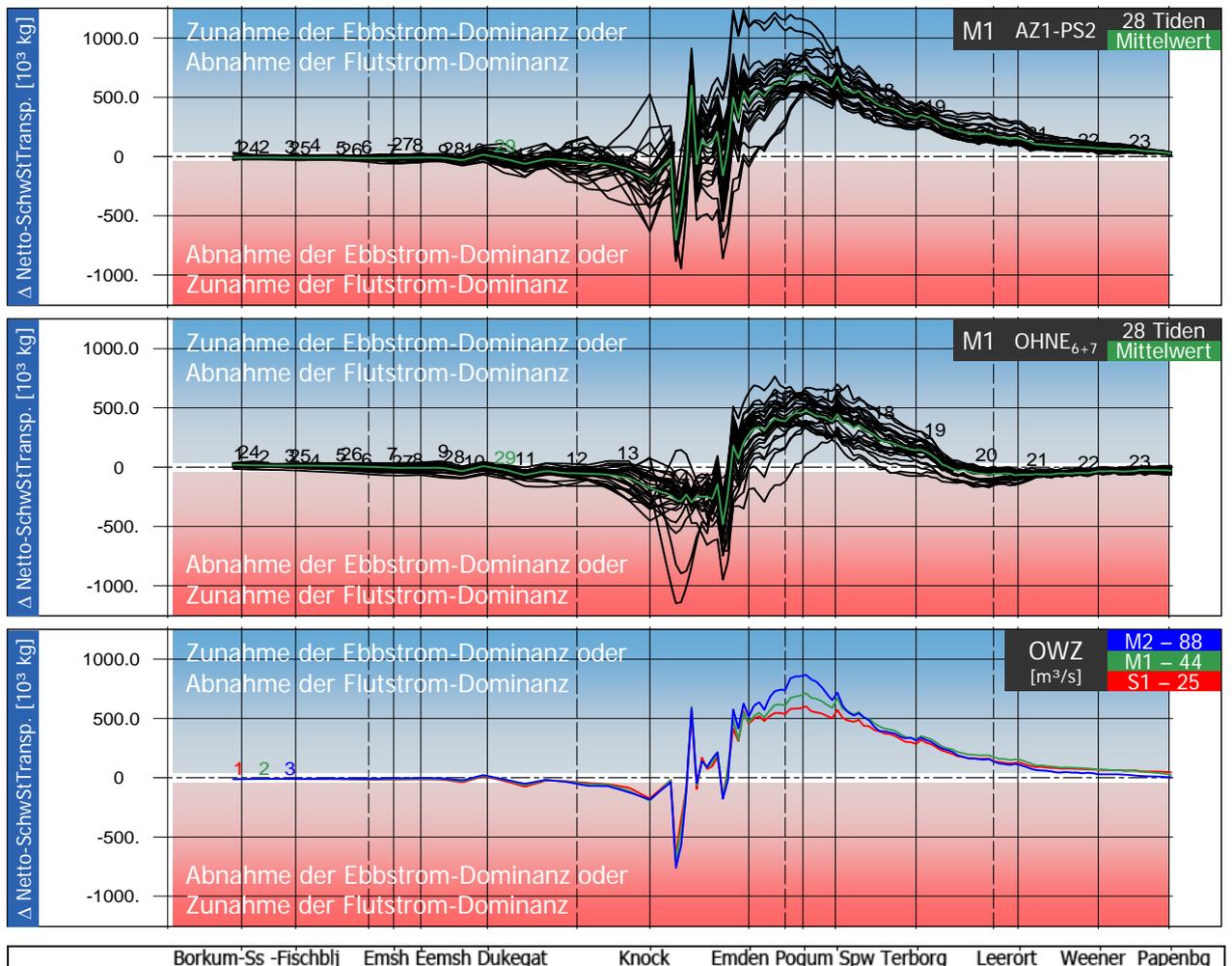


Bild 54: Ausbaubedingte Änderung des querschnittsintegrierten advektiven residuellen (Netto-) Schwebstofftransports im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg.
 Oben für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün).
 Mitte für den Ausbauzustand ohne Berücksichtigung der geplanten Querschnittseinengung.
 Unten die mittlere Änderung für die drei untersuchten Szenarien M2 (mittlerer Oberwasserzufluss (OWZ), blau), M1 (häufigster OWZ, grün) und S1 (niedriger OWZ, rot)

9.4 Wirkung des Ausbaus auf Sedimentation und Erosion

Die ausbaubedingten Änderungen des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit, des Schwebstoffgehalts und des Schwebstofftransports führen grundsätzlich auch zu morphologischen Änderungen. Diese bleiben im Wesentlichen lokal begrenzt: Eine verstärkte Sedimentation findet in der Wendestelle, im Vorhafen Emden und im Bereich der Strömungsschatten der Querschnittseinengung statt. Erosion ist im Bereich der Querschnittseinengung möglich. Darüber hinaus sind die morphologischen Änderungen sehr gering. So werden im Dollart und in der Außenems ausbaubedingte Veränderungen der Morphologie nicht messtechnisch erfassbar sein.

In der Unterems werden die Flachwasserbereiche und Hafenzufahrten tendenziell langsamer aufsedimentieren, weil der Schwebstoffgehalt und der advective residuelle Schwebstofftransport tendenziell abnehmen, aber auch diese Veränderung wird so gering ausfallen, dass sie messtechnisch nicht erfassbar sein wird.

Die langfristigen ausbaubedingten morphologischen Änderungen hängen in erster Linie vom zukünftigen Handeln des Sedimentmanagements ab (Kapitel 10).

10 Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Unterhaltungsbaggerung

10.1 Untersuchungskonzept

Kapitel 10 enthält Aussagen zu den Punkten, die im Untersuchungsumfang zum Schutzgut Wasser – Gewässermorphologie – bei der Ermittlung und Bewertung der morphologischen Veränderungen festgelegt wurden (WSD Nord-West, 2009):

1. Abschätzung der voraussichtlichen Baggermengenentwicklung bei Realisierung des Vorhabens.
2. Abschätzung der langfristigen morphologischen Veränderungen im Bereich der Unter- und Außenems sowie der Zufahrten zu den Häfen.
3. Analyse und Bewertung der Umlagerungsstellen in der Außenems und im Dollartmund mittels numerischer Modelle.

Die Abschätzung der voraussichtlichen Baggermengenentwicklung bei Realisierung des Vorhabens (Punkt 1) und der langfristigen morphologischen Veränderungen im Bereich der Unter- und Außenems sowie der Zufahrten zu den Häfen (Punkt 2) erfolgt in Kapitel 10.6. Zur Analyse und Bewertung der Umlagerungsstellen in der Außenems und im Dollartmund mittels numerischer Modelle (Punkt 3) werden zusätzliche Simulationen mit speziellen Modellkonfigurationen durchgeführt und analysiert (Kapitel 10.3, 10.4 und 10.5). Diese Modell-anwendungen dienen dazu, das Sedimentmanagement im Ist- und Ausbauzustand darzustellen und zu beurteilen.

Das Sedimentmanagement in der Unter- und in der Außenems unterscheidet sich signifikant. Während die Zufahrt von der Nordsee nach Emden kontinuierlich freigehalten werden muss, ist die Unterhaltung in der Unterems geprägt von den Überführungen der Werftschiffe aus Papenburg. Für die Aufrechterhaltung der Basistiefe in der Unterems sind nur gelegentliche Baggerungen erforderlich. Das in der Unterems episodisch anfallende Baggergut wird dem System weitgehend entzogen, während das bei der ständigen Unterhaltung des Emders Fahrwassers anfallende Baggergut im Bereich der Außenems untergebracht wird. Der Grundgedanke für diese Strategie ist das Aufrechterhalten der natürlichen Stoffkreisläufe (Krebs&Weilbeer, 2008).

Daher werden im Rahmen der in diesem Gutachten zu beantwortenden Fragestellungen nur die Unterhaltungsbaggerungen im Bereich Emders Fahrwasser/ Gatjebogen und die Umlagerung des Baggerguts auf die Unterbringungsorte in der Außenems und im Dollartmund betrachtet. Dieses Thema bearbeitet die BAW-DH im Rahmen der Deutsch-Niederländischen

Arbeitsgruppe „Baggergutunterbringung in der Außenems“ bereits seit einiger Zeit (BAW, 2012c). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen vollständig in dieses Gutachten ein. So erfolgt die Analyse und Bewertung der Unterbringungsorte unter anderem anhand von Modellierungen, die in diesem Zusammenhang durchgeführt wurden.

Die Modellierungen, die das Sedimentmanagement im Ist-Zustand abbilden, werden mit dem Ems-Modell für den Ist-Zustand des Jahres 2010 durchgeführt. Die sonst im vorliegenden Gutachten verwendeten planerischen Sollzustände PS1 und PS2 werden hier nicht genutzt, damit die Simulationen zum Sedimentmanagement im Ist-Zustand so realistisch wie möglich durchgeführt werden (Kapitel 10.4). Dadurch sind auch die ausbaubedingten Änderungen im Vergleich mit dem Ausbauzustand AZ1 im Sinne einer *worst-case* Betrachtung so groß wie möglich (Kapitel 10.5).

10.2 Baggerbereiche und Unterbringungsorte

Der Grafik in Bild 55 ist zu entnehmen, dass der Großteil der jährlichen Baggermengen in der Außenems im Zeitraum 1982 – 2010 im Emdener Fahrwasser und im Gattjebogen angefallen ist. Dieses vorwiegend schluffige Baggergut wurde fast ausschließlich auf die Klappstellen 5 und 7 verbracht (Bild 56). Die weiter seewärts liegenden Unterbringungsorte werden für sandiges Baggergut genutzt, da diese in der Nähe von Borkum liegen und eine Beeinträchtigung der Sandstrände durch Weichsedimente vermieden werden soll. Die Gesamtbaggermenge schwankte in den letzten Jahren zwischen 5 und 8 Mio. m³. Die Klappstellen 5 und 7 werden alljährlich jeweils mit 3±1 Mio. m³ beaufschlagt (Bild 57).

Das in der Vorhabensbeschreibung zur Vertiefung der Außenems (WSA Emden, 2012a) beschriebene Verbringungskonzept sieht im Jahr des Ausbaus und im darauf folgenden Jahr eine Beaufschlagung der Klappstellen 5 und 7 mit jeweils 4 Mio. m³/a vor. Die Erfahrungswerte aus der Baggerpraxis wie auch die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, dass die Kapazität dafür vorhanden ist. Darüber hinaus ist eine Beaufschlagung der Klappstelle K2 im Dollartmund mit maximal 1 Mio. m³/a vorgesehen. Hierzu finden sich in den Kapiteln 10.3, 10.4 und 10.5 Aussagen. Für das beim Ausbau anfallende sandige Baggergut sollen die seewärts liegenden Klappstellen 2 und 4 mit maximal 0.5 Mio. m³ beaufschlagt werden.

Diese Mengen wurden auch schon in der Vergangenheit dort verbracht (Bild 57). Die Beaufschlagung dieser Unterbringungsorte mit sandigen Sedimenten in der geplanten maximalen Menge kann auch ohne detaillierte Untersuchungen als unkritisch angesehen werden. Die Wassertiefen sind groß und die Klappstellen 2 und 4 befinden sich in einer sandigen, marinen Umgebung.

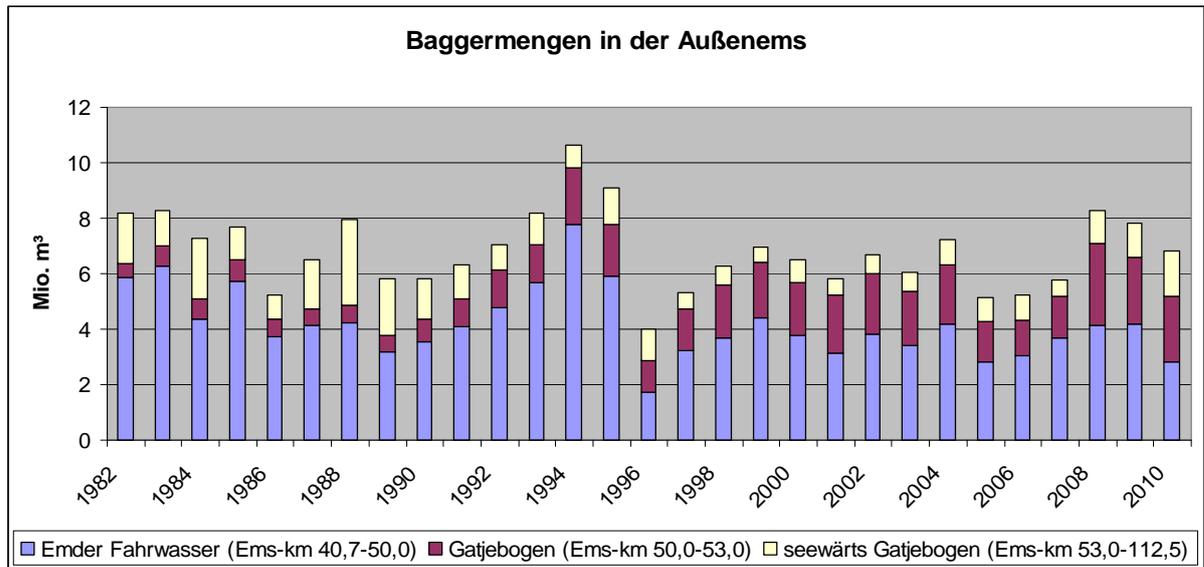


Bild 55: Jährliche Baggermengen in der Außenems von 1982 – 2010 in Mio. m³, (Datenquelle: WSA Emden)

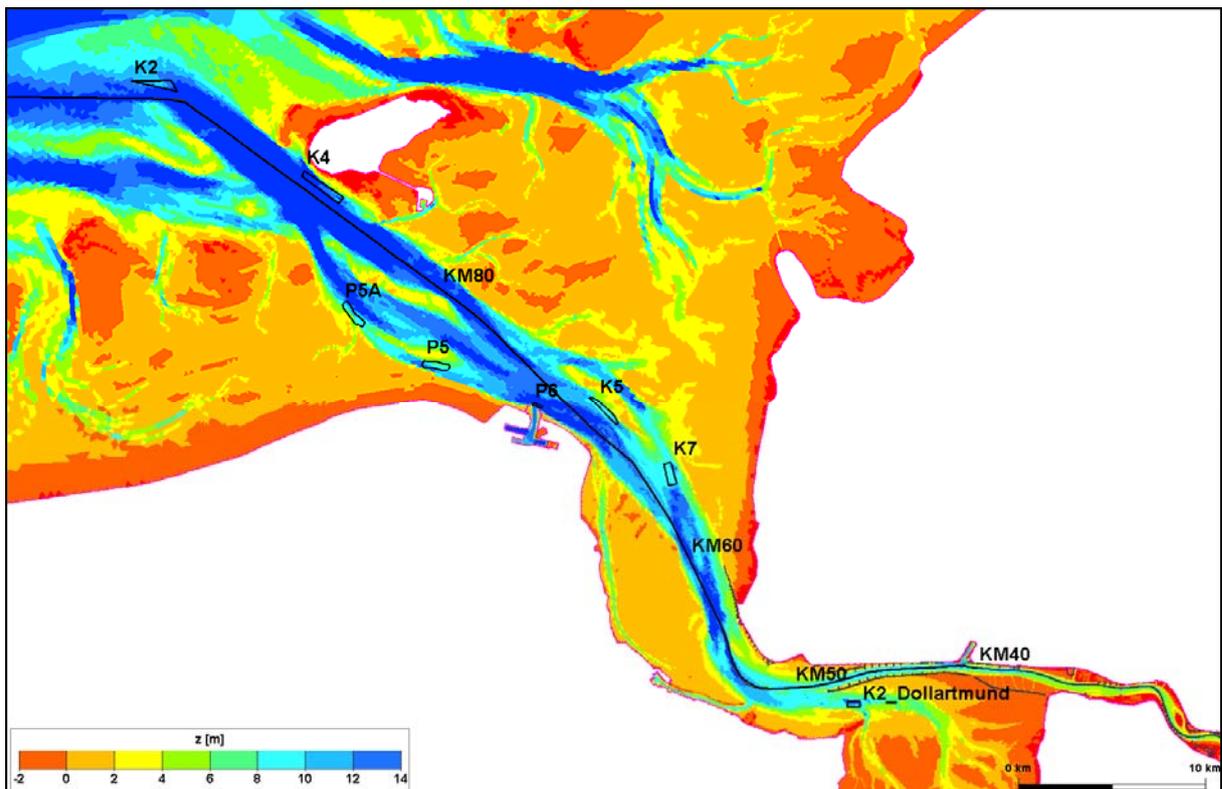


Bild 56: Niederländische und deutsche Unterbringungsorte im Ems-Dollart-Gebiet.

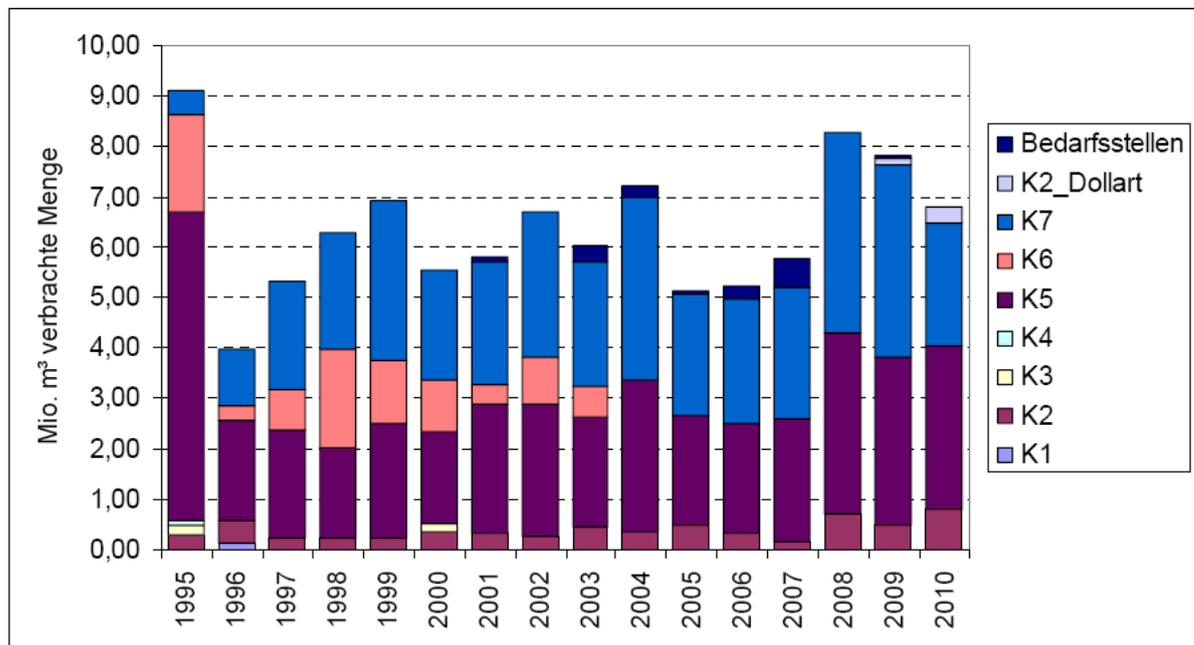


Bild 57: Jährliche Beaufschlagung der einzelnen Unterbringungsorte mit den von deutscher Seite von 1995 bis 2010 anfallenden Mengen (Quelle: WSA Emden).

10.3 Analyse der Unterbringungsorte

Die BAW-DH bearbeitet im Rahmen der Deutsch-Niederländischen Arbeitsgruppe „Baggergutunterbringung in der Außenems“ dieses Thema bereits seit 2008 (BAW, 2012c). Die dabei erarbeiteten Erkenntnisse zur Wirkungsweise der Unterbringungsorte können an dieser Stelle eingebracht werden. Abweichend von den anderen in diesem Gutachten verwendeten Ergebnissen sind diese auf der Basis des Emsmodells des Jahres 2005 entstanden. Da sie aber grundlegende Informationen über das Systemverhalten liefern, werden sie hier ergänzend verwendet.

In einer systematischen Untersuchung wurde dabei die Verdriftung unterschiedlicher Sedimente aus dem Bereich der derzeit aktuellen und geplanten deutschen und niederländischen Unterbringungsorte untersucht. Mit Hilfe dieser Modellstudien konnten Transportpfade und Einflussbereiche der Unterbringungsorte identifiziert werden. Die Analyseergebnisse dieser speziellen Anwendung des Ems-Modells geben einen vertieften Einblick in die Charakteristik des Sedimenttransportes in der Außenems und bilden eine Basis, um die bestehende Baggerpraxis beurteilen zu können.

Mit dem topografischen Zustand des Ems-Dollart-Gebietes aus dem Jahr 2005 wurde ein 4-wöchiger Zeitraum (02.05.-30.05.) simuliert und analysiert. In verschiedenen Modellsimulati-

onen wurden abweichend vom sonst vorgegebenen Sedimentinventar in den Bereichen der Unterbringungsorte zu gleichen Anteilen drei Schwebstofffraktionen an der Sohle vorgegeben, die während der Simulation erodiert werden und sich durch den Transport in Suspension im Modellgebiet ausbreiten können. Die verwendeten Schwebstofffraktionen unterscheiden sich durch ihre Sinkgeschwindigkeiten (Grobschluff ~ 2mm/s, Mittelschluff ~0.5 mm/s, Feinschluff ~0.13 mm/s). Je geringer die Sinkgeschwindigkeit ist, umso weiter wird der Schwebstoff im Wasserkörper transportiert.

Diese Art der Modellanwendung muss als numerisches Experiment angesehen werden. Die gesamte Fläche der Klappstelle ist gleichmäßig mit leicht zu erodierenden Sedimenten vorbelegt. Das ist eine pessimistische Annahme, da der Erosionsfluss auf der gesamten Fläche wirkt. In der Realität werden bei jedem Verklappvorgang andere Bereiche der Klappstelle angesteuert und der Verklappvorgang selbst findet nur in einen kleinen Teil des Klappstellenbereiches statt. Bei den Modellanwendungen in dem Kapitel 10.5 wird dies berücksichtigt, indem bei einem Verklappvorgang nur ein Teil der Klappstelle beaufschlagt wird.

In Kapitel 10.3 geht es zunächst weniger um absolute quantitative Aussagen, sondern vornehmlich um Ausbreitungscharakteristika: Welche Bereiche werden beeinflusst, wie viel geht prozentual stromauf und stromab?

Jeweils ein repräsentatives Ergebnis für die in diesem Gutachten relevanten Klappstellen 5, 7 und K2 wird nachfolgend kurz beschrieben.

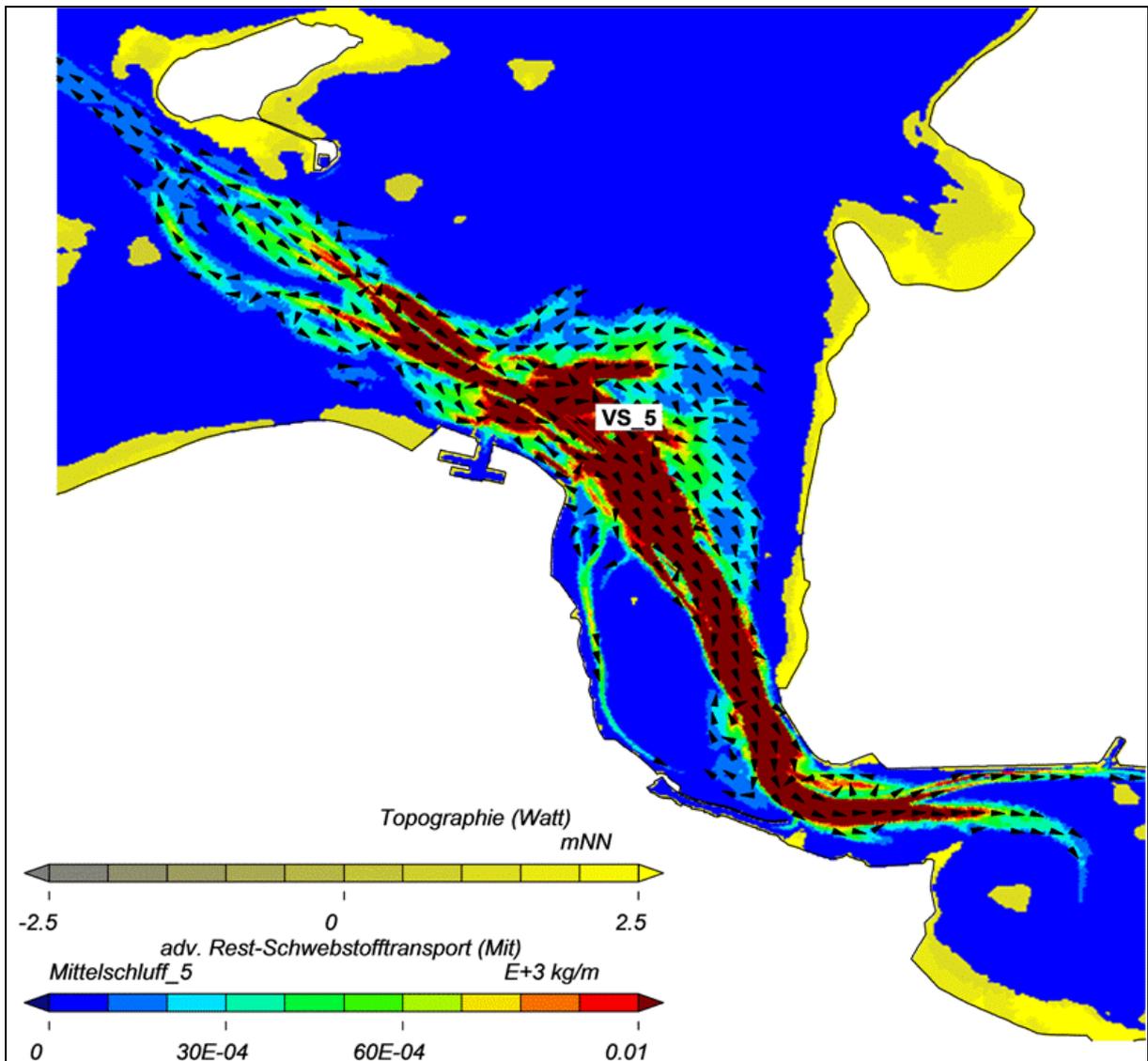


Bild 58: Der advektive Rest-Schwebstofftransport von Mittelschluff zeigt den Einflussbereich der Klappstelle 5.

Anhand des advektiven Netto-Schwebstofftransports von Mittelschluff kann der jeweilige Einflussbereich und die vorherrschende Transportrichtung dargestellt werden. In Bild 58 kann man für die Klappstelle 5 erkennen, dass die vorherrschende Transportrichtung stromauf in Richtung Emders Fahrwasser gerichtet ist. Eine Querschnittsanalyse ergibt, dass innerhalb des Simulationszeitraumes nur ca. 20% seewärts transportiert werden, während 80% der erodierten Sedimente stromauf transportiert werden. Nach 4 Wochen befinden sich die ersten Sedimente bereits wieder im Emders Fahrwasser. In der heutigen Praxis wird die Klappstelle 5 in der Regel bei Ebbeströmung angesteuert. Dadurch kann das ungünstige Flut:Ebbe-Verhältnis des Schwebstofftransportes leicht verbessert werden.

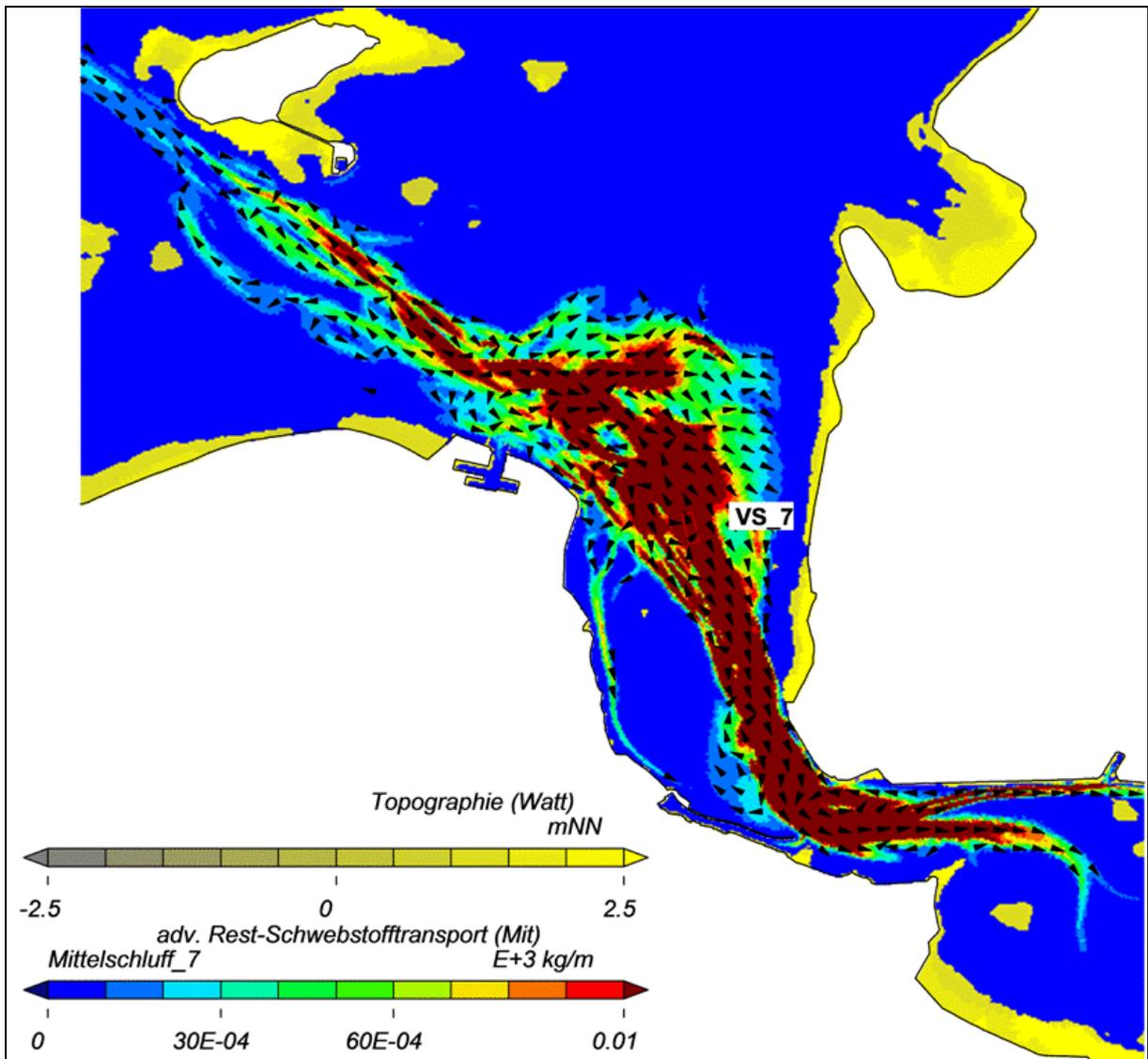


Bild 59: Der advective Rest-Schwebstofftransport von Mittelschluff zeigt den Einflussbereich der Klappstelle 7.

Durch die Lage der Klappstelle 7 weiter östlich des bestehenden Fahrwassers werden Sedimente nicht nur in der Fahrrinne, sondern auch durch die Nebenrinne (Emshörn) transportiert (Bild 59). Das Ausbreitungsmuster ist dem der Klappstelle 5 ähnlich, die niedersächsischen Wattgebiete (Manslagter und Rysumer Nacken) werden aber stärker beeinflusst.

Für die Klappstelle 7 ergibt eine Querschnittsanalyse, dass innerhalb des Simulationszeitraumes nur ca. 35% seewärts transportiert werden, während 65% der erodierten Sedimente stromauf transportiert werden. In der heutigen Praxis wird die Klappstelle 7 in der Regel bei Flutströmung angesteuert. Dadurch wird sich das F:E-Verhältnis leicht verschlechtern.

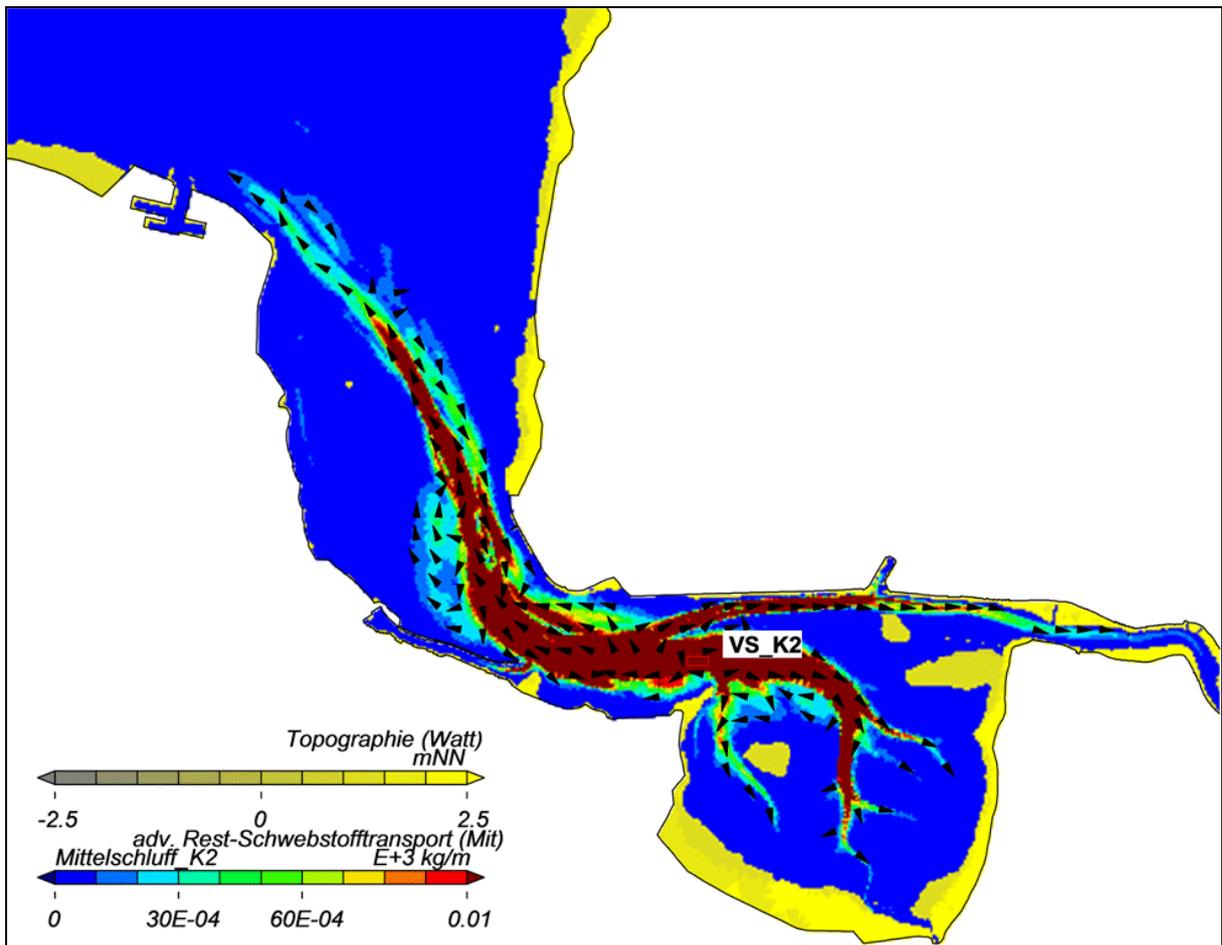


Bild 60: Der advektive Rest-Schwebstofftransport von Mittelschluff zeigt den Einflussbereich der Klappstelle K2.

Die Klappstelle K2 unterscheidet sich deutlich von den übrigen Unterbringungsarten (Bild 60), da sie direkt vor dem Dollart liegt und zudem an dieser Stelle auch die größten Tiefen im Vergleich zu den anderen Unterbringungsarten vorliegen. Mittelschluff wird durch das große Tidevolumen weit in den Dollart hinein transportiert und verbleibt dort zu einem großen Anteil. Ein kleiner Teil verdriftet aber auch in das Emdener Fahrwasser und erreicht innerhalb des Zeitraumes den Emdener Außenhafen.

Man kann grundsätzlich sagen, dass bei allen untersuchten Unterbringungsarten im Bereich der Außenems der Transport in Flutstromrichtung wesentlich ausgeprägter ist als mit dem Ebbestrom. Bereits innerhalb der simulierten 4 Wochen erreichen erodierte Sedimente von diesen Unterbringungsarten das Emdener Fahrwasser. Die in Kapitel 5.4.3 beschriebene Flutstromdominanz des Sedimenttransportes in der Außenems wird damit bestätigt.

Die Analyse der Sedimentverdriftung von den Unterbringungsarten zeigt bereits an, dass der in der Außenems ausgeprägte Transport stromauf durch die Unterhaltungsstrategie intensi-

viert wird. Nur ein sehr kleiner Anteil der umgelagerten Sedimente wird dauerhaft mit der Ebbeströmung aus dem Ästuar entfernt. Lediglich die deutsche Klappstelle 7 und die Klappstelle K2 im Dollartmund weisen hinsichtlich der vorherrschenden Transportrichtungen im Sinne des Wiedereintriebs etwas positivere Eigenschaften auf. Diese Transportcharakteristik zeigt an, dass das Optimierungspotential für die derzeit praktizierte Umlagerungspraxis innerhalb der Außenems klein zu sein scheint. Änderungen am Sedimentmanagement werden den Systemzustand nicht unmittelbar verbessern. Die Modelluntersuchungen dieses Gutachtens in den Kapiteln 10.4 und 10.5 werden diese Ergebnisse bestätigen.

Auch anhand gemessener topographischer Veränderungen kann man nachweisen, dass das auf den Unterbringungsorten eingebrachte Sediment nicht dauerhaft dort verbleibt. Dies ist anhand der Differenztopographie zwischen den digitalen Geländemodellen der Ems von 2010 und 2005 erkennbar (Bild 61). Obwohl dort jährlich auf eine Fläche von ca. 500.000 m² ca. 3±1 Mio. m³ Feinsedimente verbracht werden (siehe Bild 57), sind direkt im Bereich der Unterbringungsorte kaum signifikante Veränderungen der Sohlhöhe zu beobachten, die mit der Beaufschlagung durch Baggergut in Zusammenhang stehen könnten.

Aufgrund der starken Erosion werden die Klappstellen 5 und 7 das zusätzliche Ausbaubaggergut und die erhöhten Baggermengen aus der Unterhaltungsbaggerung aufnehmen können. Der vorhandene Sedimentkreislauf wird dadurch verstärkt.

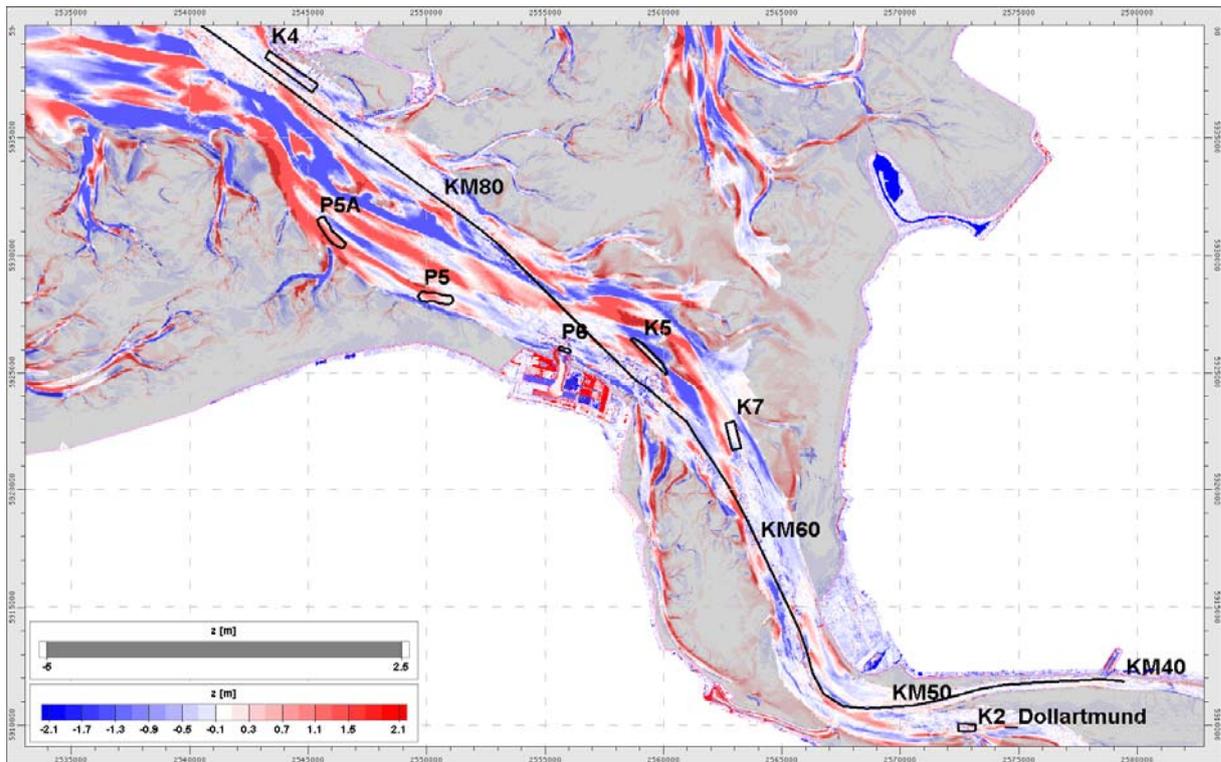


Bild 61: Ausschnitt der Differenztopographie der digitalen Geländemodelle aus den Jahren 2010 und 2005. Rot: 2010 flacher; Blau: 2010 tiefer. Die Lage der Unterbringungsorte ist markiert. Als Orientierungshilfe sind Bereiche oberhalb einer Wassertiefe von 2,5 m grau unterlegt.

10.4 Simulation und Analyse aktueller und alternativer Unterhaltungsstrategien

Mit dem aktuellen Emsmodell wurde ein vierwöchiger Zeitraum simuliert (22.04.-21.05.2010) und die Ergebnisse der letzten 14 Tage analysiert. Die Modellsteuerung entspricht der in Kapitel 5.3 des Gutachtens zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang beschriebenen, für den Oberwasserzufluss wurde der häufigste Abfluss (M1) gewählt.

Zur Identifikation des Anteils des Sedimentmanagements am gesamten Sedimenttransport wird unter zusätzlicher Verwendung des Moduls „DredgeSim“ (Maerker&Malcherek, 2007) während einer Simulation das Baggergeschehen durch zeitgesteuerte Operationen berücksichtigt. Das Baggergeschehen wird dabei durch die Definition von Bagger- und Verbringbereichen und die Vorgabe von Baggerereignissen (Sedimentmengen und Bearbeitungszeiträume) gesteuert. Umgelagert werden die Sedimente, die sich zum Zeitpunkt des Baggerereignisses in dem Baggerpolygon befinden. Bild 62 zeigt die zur Programmsteuerung benötigten Angaben.

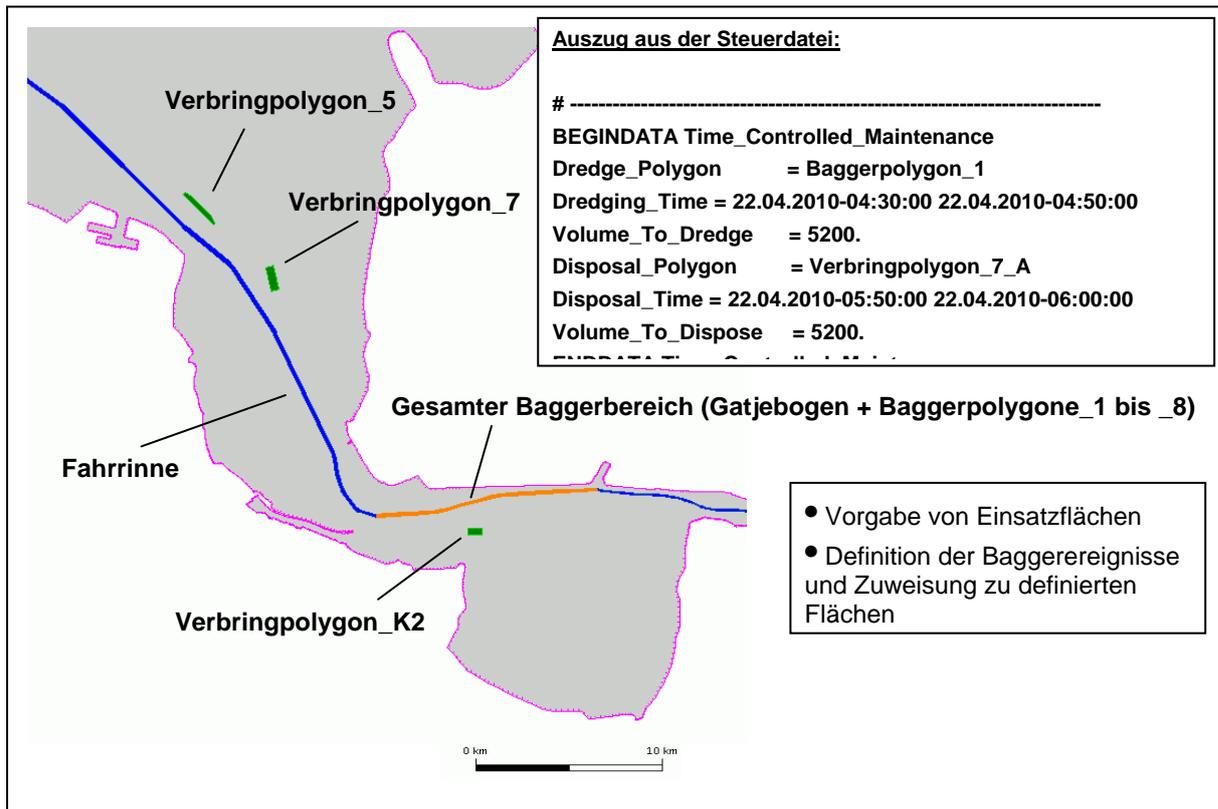


Bild 62: Zur Steuerung von Baggerereignissen in DredgeSim

Es werden verschiedene Unterhaltungsstrategien untersucht, um deren Auswirkungen auf das Sedimenttransportgeschehen im Ästuar zu ermitteln. Im Anschluss an diese Variantenprüfung wird die Variante, die den geringsten Wiedereintrieb verursacht, in der Ausbautopographie AZ1 überprüft, um die ausbaubedingten Veränderungen festzustellen (Kapitel 10.5).

Innerhalb des Simulationszeitraumes wird in unterschiedlichen Teilbereichen des Emders Fahrwassers und – je nach Szenario - des Gatjebogens gebaggert und anschließend gemäß der untersuchten Unterhaltungsstrategie auf Teilbereiche der Unterbringungsorte verbracht. Die Umlaufzeiten wurden anhand realer Daten festgelegt. Es werden 5200 m³ Baggergut pro Baggervorgang umgelagert, ein Umlauf zu den Klappstellen 5 und 7 benötigt 2,5 Stunden, zu K2 1,5 Stunden. Der Baggerbetrieb erfolgt über 24h, so dass während des Simulationszeitraumes mit 291 Umläufen ca. 1.5 Mio. m³ Sedimente umgelagert werden. Beim Szenario C (Tabelle 9) werden wegen der kürzeren Umlaufzeit zu K2 352 Umläufe simuliert. Die Analyse veränderter Sedimentkonzentrationen und veränderter Nettotransporte gegenüber einem Vergleichszustand zeigt den Einfluss der Unterhaltungsstrategie.

Die Tabelle 9 listet die untersuchten Varianten auf.

Szenario	Kommentar	Baggerbereich	Verbringbereich
Referenz			
0	Status quo	EFW	Klappstelle 5 bei Ebbe Klappstelle 7 bei Flut
0II	Status quo	2 Tage EFW und 1 Tag Gatjebogen im Wechsel	Klappstelle 5 bei Ebbe Klappstelle 7 bei Flut
CII	Tidephasen-orientiert	2 Tage EFW und 1 Tag Gatjebogen im Wechsel	K2 bei Hochwasser (Knock > 5,5m üPN), Klappstelle 5 bei restlicher Ebbe Klappstelle 7 bei restlicher Flut
E	Totalentnahme	EFW	

Tabelle 9: Szenarien im Sedimentmanagement (Emsmodell 2010)

Es werden sowohl der Baggerbereich als auch die Unterbringungsorte variiert. Das Emders Fahrwasser wird bei allen Szenarien gebaggert. Die Szenarien, bei denen auch im Gatjebogen gebaggert wird, sind mit einer römischen II gekennzeichnet. Das Emders Fahrwasser ist in 8 Abschnitte aufgeteilt und wird derzeit (Szenarien 0 und 0II) von West nach Ost gebaggert. Während des vierwöchigen Simulationszeitraumes wird das gesamte Emders Fahrwasser einmal komplett bearbeitet.

Als Referenz dient ein Zustand, bei dem keine Sedimentumlagerungen stattfinden. In der Realität wird das gebaggerte Sediment derzeit tidenabhängig bei Ebbeströmung auf die Klappstelle 5 und bei Flutströmung auf die Klappstelle 7 verbracht. Dieses Szenario, das den „Status quo“ beschreibt, wird nachfolgend Szenario 0 genannt.

Weitere Szenarien wurden im Rahmen der Arbeiten für die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe „Baggergutunterbringung in der Außenems“ untersucht (BAW, 2012c). Auf den Erkenntnissen dieser Vorarbeiten aufbauend wurden für dieses Gutachten nur die Szenarien berücksichtigt, die ein gewisses Potential zur Verbesserung des Systems haben. Dies ist insbesondere die Szenarien C und CII, die nicht nur die Klappstellen 5 und 7 nutzen, sondern auch die Klappstelle K2 in der Dollartmündung, die aber nur in einem kleinen Zeitfenster um Tidehochwasser herum angesteuert werden kann. Im Szenario E schließlich wird wiederum nur im Emders Fahrwasser gebaggert, das Material aber dem System nicht wieder zugeführt.

Die Modellszenarien 0II und CII werden zunächst zu dem Referenzzustand in Beziehung gesetzt, bei dem kein Sediment umgelagert wird. In der Differenz des advektiven Rest-Schwebstofftransportes zum Referenzzustand (Bild 63 und Bild 64) kann man bei beiden Szenarien deutlich die Erhöhung des Sedimenteintriebs durch die Umlagerungspraxis er-

kennen. Die Änderungen erstrecken sich vom Emden Fahrwasser in die Außenems bis zu den Klappstellen 5 und 7 und im Szenario 0II noch darüber hinaus. Außerdem werden durch den Baggerbetrieb mehr Schwebstoffe in den Dollart transportiert. Beim Szenario CII (Bild 64) wird der Transport in den Dollart zusätzlich erhöht, da mit dem Flutstrom vermehrt Sedimente aus dem Klappstellenbereich K2 erodiert werden.

Durch die Umlagerung auf die Klappstellen 5 und 7 wird der Import von Schwebstoffen um bis zu 400 t/Tide erhöht. Dieses Ergebnis bestätigt die Ausführungen in Kapitel 10.3. In Relation zum Gesamttransport (Bild 49) bedeutet dieser Wert, dass die Erosion aus den beiden Klappstellen lokal bis zu 10% am Gesamttransport ausmachen kann.

Durch einen Verklappvorgang werden lokal die Schwebstoffkonzentrationen kurzfristig extrem erhöht. Dieser Prozess ist in diesen Modellanwendungen nicht detailliert berücksichtigt. Daher sind die großräumigen Auswirkungen auf die maximalen Schwebstoffkonzentrationen (Bild 65 und Bild 66) weniger im Klappstellenbereich zu finden als vielmehr aus den angrenzenden Wattgebieten. Durch die zusätzliche Erosion der auf die Unterbringungsorte eingebrachten Sedimente wird die maximale Schwebstoffkonzentration in der Nähe der Klappstellen im Mittel um ca. 0.02 kg/m^3 erhöht. Auf dem östlich angrenzenden Rysumer Nacken werden die maximalen Schwebstoffkonzentrationen um bis zu 0.1 kg/m^3 erhöht. Die erhöhten Schwebstoffkonzentrationen im Emden Fahrwasser und damit verbunden die Verstärkung der Flutstrom-Dominanz (Bild 63 und Bild 64) resultieren aus dem dortigen Baggerbetrieb, durch den immer wieder „frische“ Sedimente aus der anfänglichen Vorbelegung an die Oberfläche des Bodens gelangen, die dann – anders als im Referenzzustand – in Suspension geraten können.

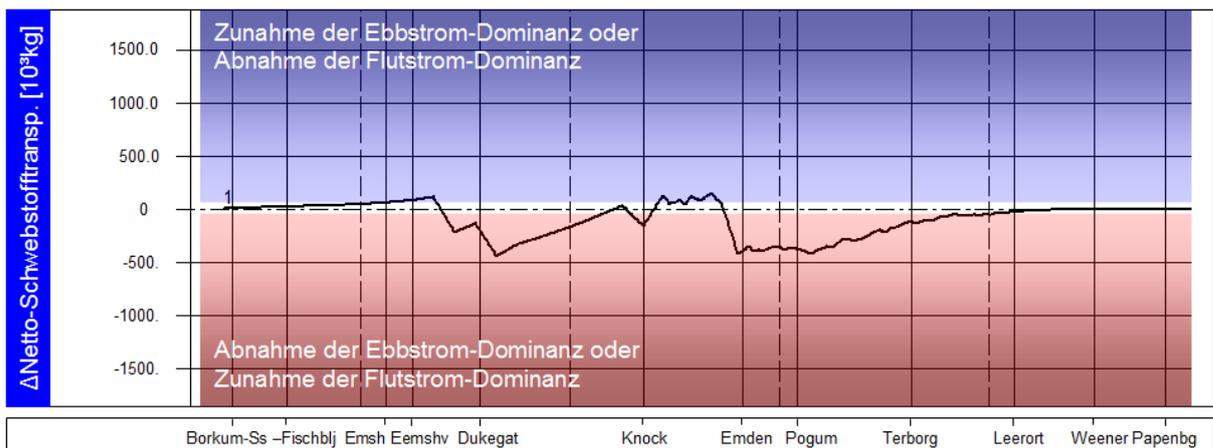
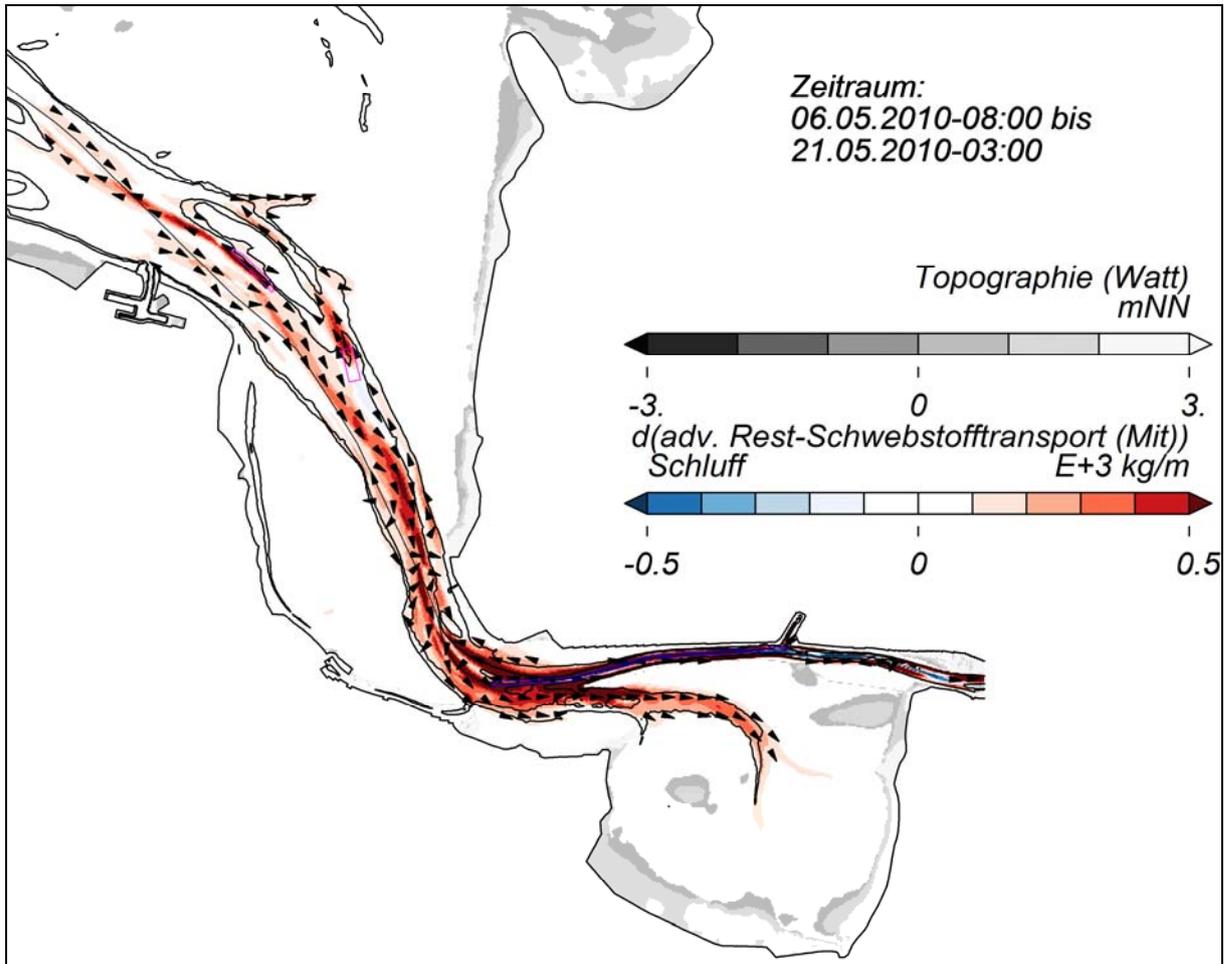


Bild 63: Variante 0II – Referenz: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt. Der Farbverlauf oben ist so definiert, dass Bereiche, in denen die dargestellte Größe in Variante 0II größer ist als im Referenzlauf, rot eingefärbt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 100 kg/m, Änderungen kleiner als ± 100 kg/m werden nicht dargestellt.

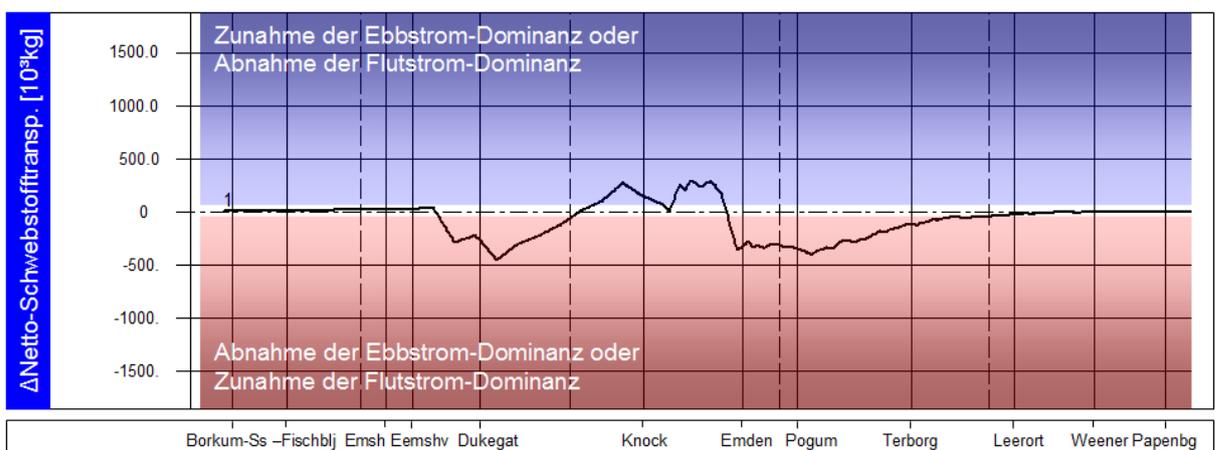
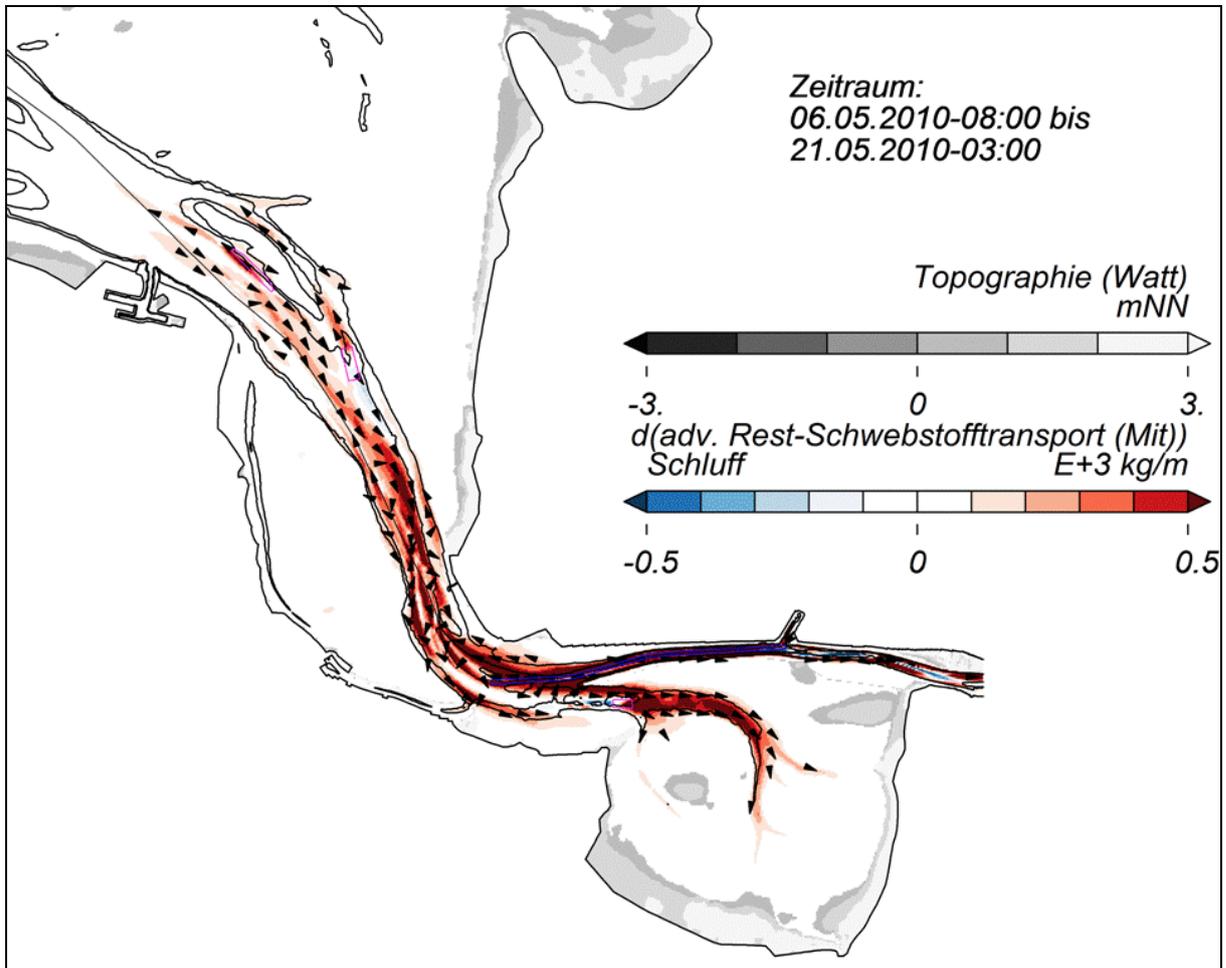


Bild 64: Variante CII – Referenz: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt.

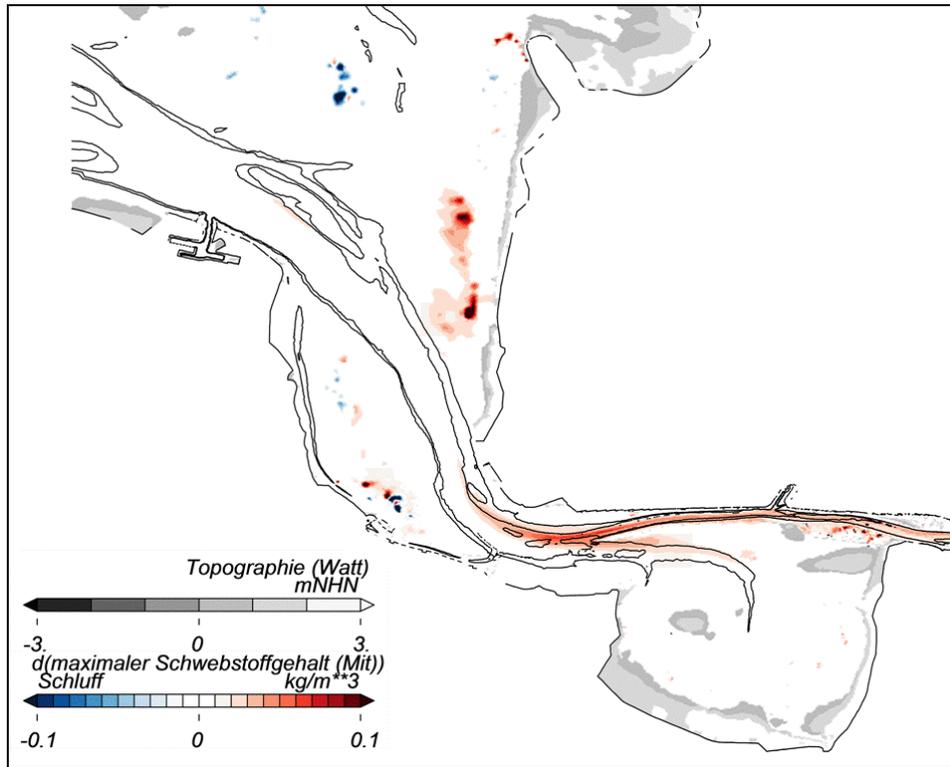


Bild 65: Variante 0II – Referenz: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration.

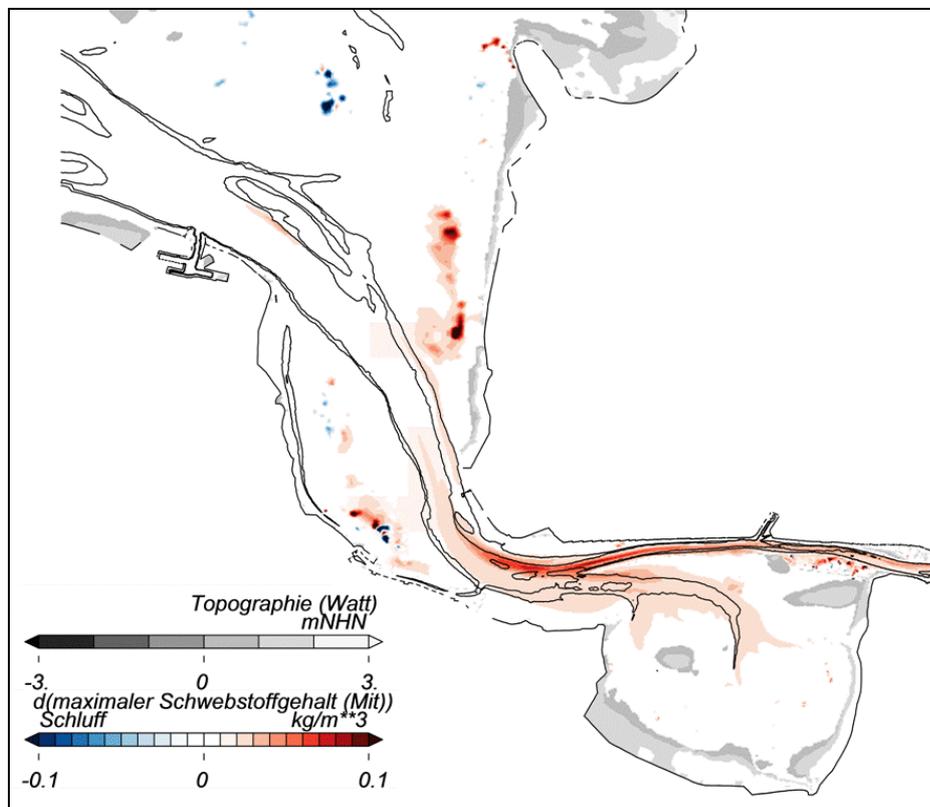


Bild 66: Variante CII – Referenz: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration.

Ein direkter Vergleich der Szenarien CII und 0II ist in Bild 67 zu sehen. Hier erkennt man im Außenbereich eine leichte Abnahme des Nettotransportes, da im Szenario CII die Klappstellen während des Simulationszeitraumes seltener angelaufen wurden als im Szenario 0II. Dahingegen wird bei CII auch die im Dollartmund liegende Klappstelle K2 beschickt. Der Austrieb aus dem Klappstellenbereich K2 ergibt in der Differenz zur Variante 0II die Veränderung im Netto-Schwebstofftransport. Die Beaufschlagung der Klappstelle K2 erhöht die maximalen Schwebstoffkonzentrationen auf einer Strecke von ca. 5 km stromauf und stromab der Klappstelle im Mittel um ca. 0.02 kg/m^3 (Bild 69).

Die Differenz der Szenarien E und 0 weist eine deutliche Abnahme des Netto-Schwebstofftransportes im Außenems-Bereich auf (Bild 68). Da kein Sediment auf die Unterbringungsorte gebracht wird, verringert sich der Import in das Ästuar. Die Reduktion des Nettotransportes beträgt in dem Analysezeitraum ca. 250 t/Tide . Die Auswirkungen auf die Schwebstoffkonzentrationen sind recht gering (Bild 70). Das heißt aber nicht, dass eine konsequente Entnahme des Baggerguts (bzw. eine Verbringung in der Nordsee) keine Auswirkungen auf den Sedimenthaushalt hätte. Grundsätzlich würde diese Strategie die Schwebstoffmengen und Schwebstoffkonzentrationen im Emden Fahrwasser verringern. Das würde folglich auch den Transport in die Unterems abmindern. Andererseits limitieren derzeit die zur Verfügung stehenden Unterbringungsmöglichkeiten diese Variante ebenso wie die Kosten aufgrund der langen Wege, die eine Verbringung in der Nordsee mit sich bringen würde.

Unabhängig von der Unterhaltungsstrategie findet ein stetiger Import von Sediment statt. Eine moderat veränderte Strategie wird keine unmittelbaren Erfolge zeigen, da nur ein kleiner Teil des Sedimenttransportes verändert wird. So verringert die Nutzung von Klappstelle K2 den Wiedereintrieb des Baggergutes, da ein größerer Anteil in den Dollart transportiert wird. Auch die Entnahme des Baggergutes in der Variante E verringert den Wiedereintrieb. Beide Maßnahmen ändern aber kurzfristig nur wenig an dem alltäglichen Sedimentimport in das System.

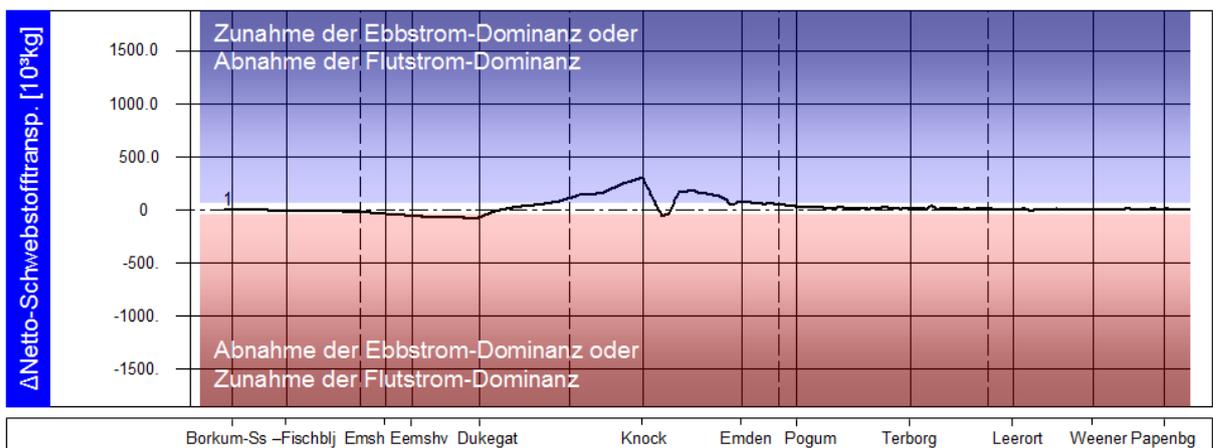
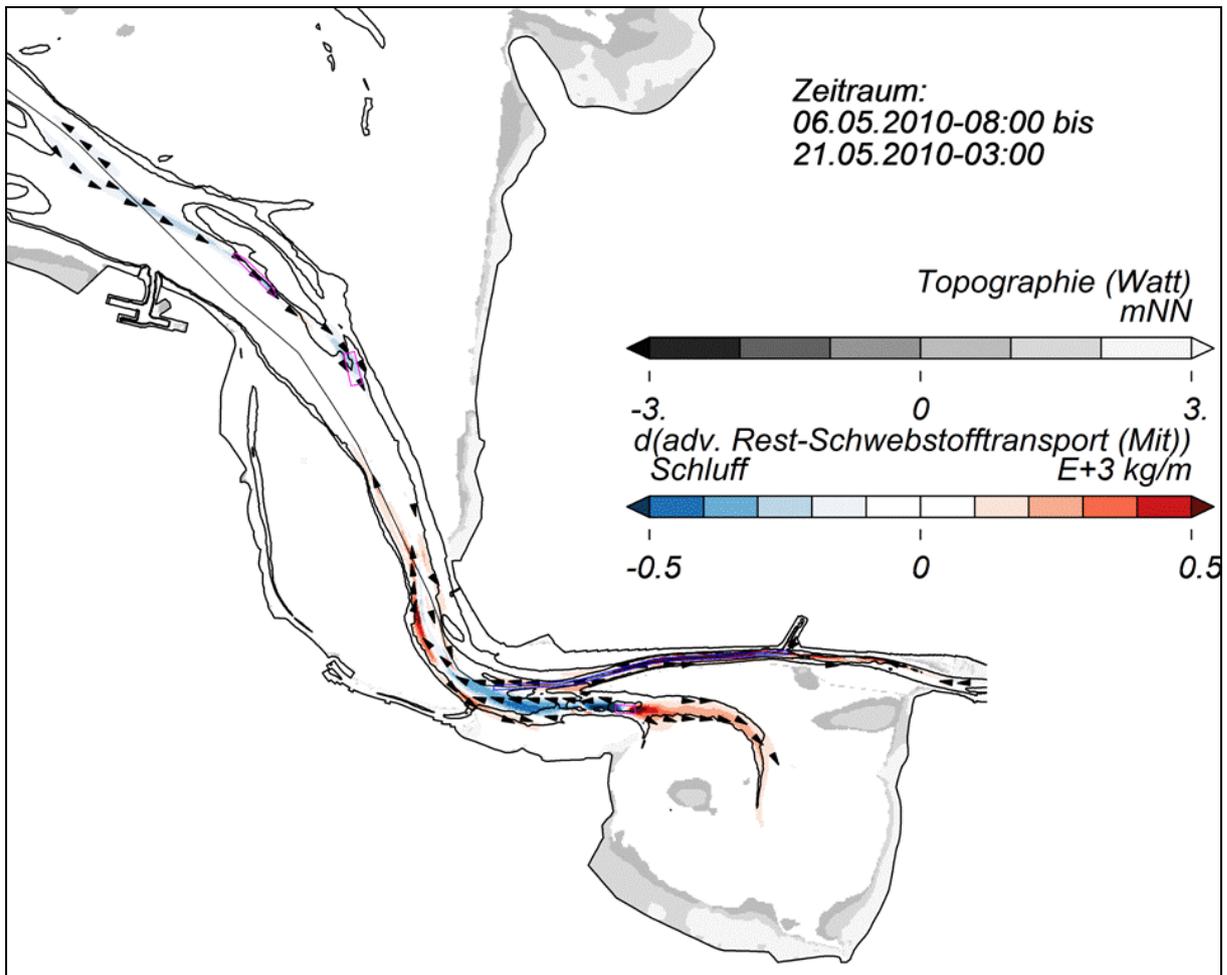


Bild 67: Variante CII – Variante 0II: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt.

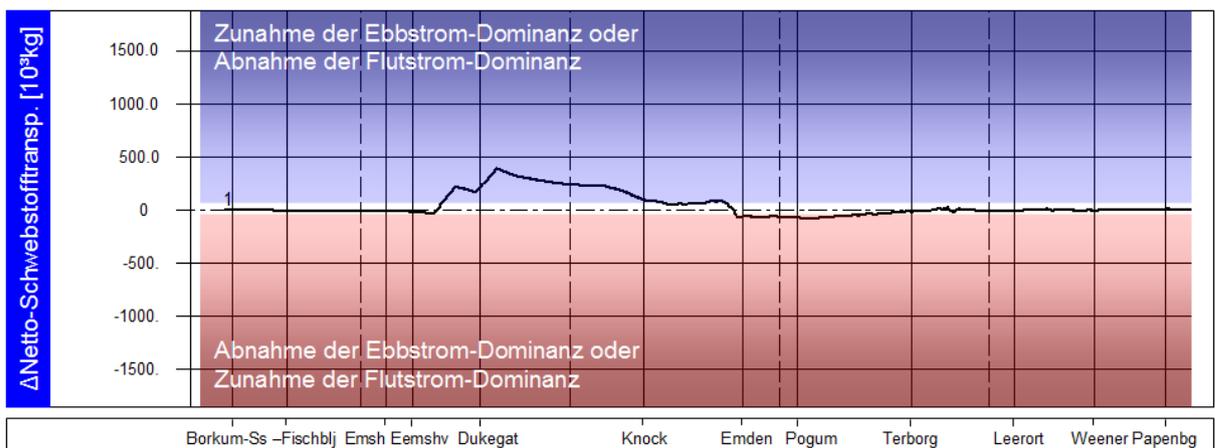
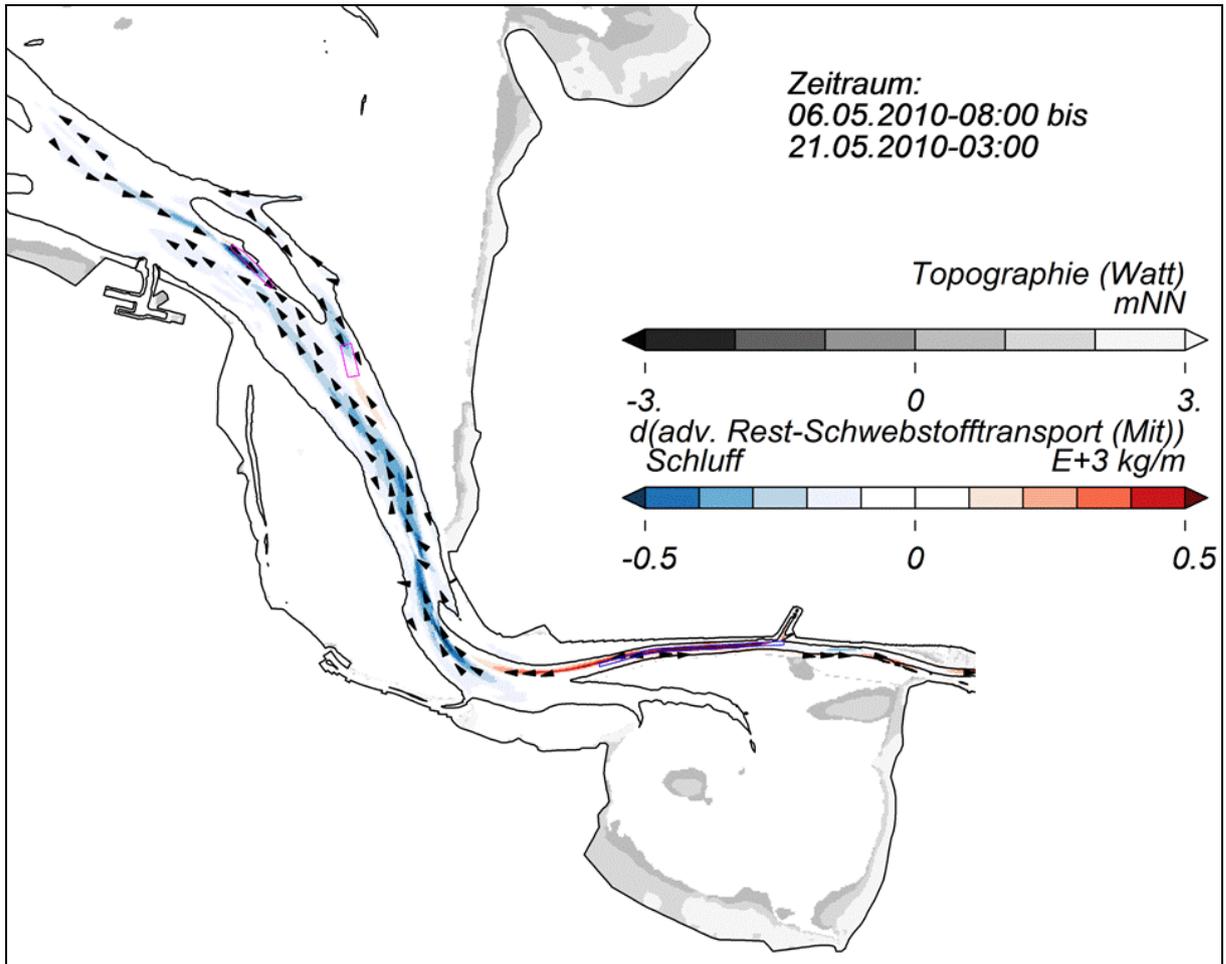


Bild 68: Variante E – Variante 0: Differenz des Netto-Schwebstofftransportes, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt.

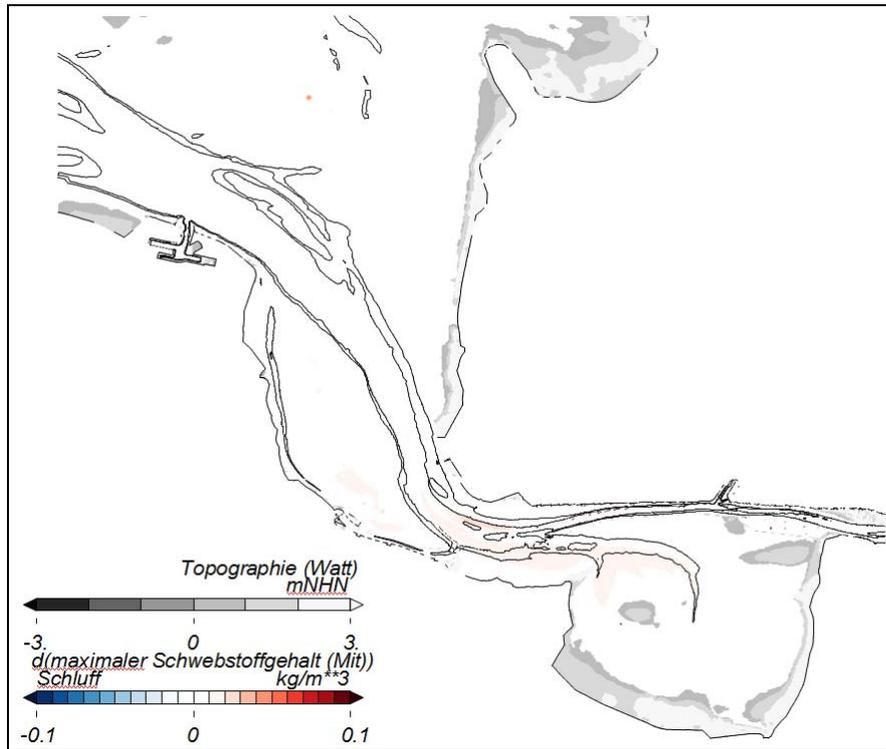


Bild 69: Variante CII – Variante 0II: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration.

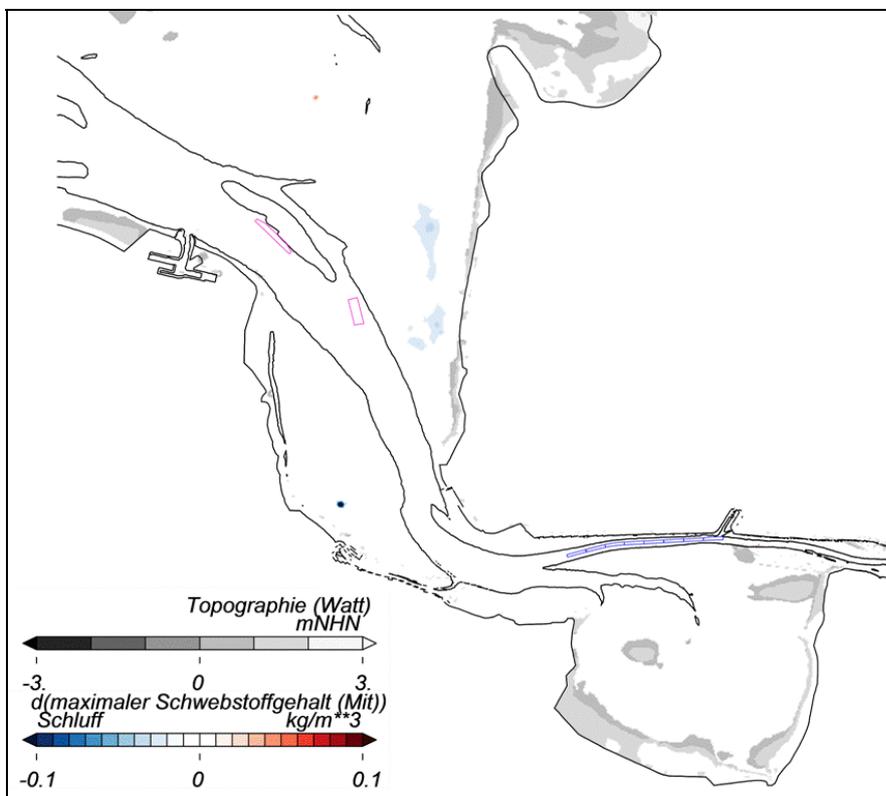


Bild 70: Variante E – Variante 0: Differenz der max. Schwebstoffkonzentration.

10.5 Die Unterhaltungsstrategie im Ausbauzustand

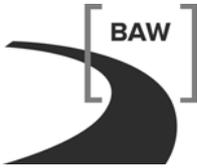
Dem Konzept der wasserbaulichen Systemanalyse folgend wurden zwei der in Kapitel 10.4 betrachteten Varianten zusätzlich mit der Modelltopografie des Ausbauzustandes AZ1 (Kapitel 4.3) gerechnet. Es handelt sich um die derzeit praktizierte Umlagerungsstrategie (Szenario 0II) und um das Szenario CII, bei dem zusätzlich zu den bisher angelaufenen Klappstellen 5 und 7 auch die neue Klappstelle K2 im Dollartmund beschickt wird. Die Unterhaltungsbaggerungen wurden jeweils im Emden Fahrwasser und im Gatjebogen durchgeführt. Ausbaubedingte Veränderungen werden zu den in Kapitel 10.4 beschriebenen Simulationen im Ist-Zustand berechnet.

Die ausbaubedingten Änderungen des Netto-Schwebstofftransportes unter Berücksichtigung der verschiedenen Umlagerungsszenarien unterscheiden sich nur geringfügig (Bild 71 und Bild 72). Die Verstärkung der Flutstrom-Dominanz südlich der Klappstellen ist klein im Vergleich zu den Veränderungen im Emden Fahrwasser. Eine stärkere Beaufschlagung der Klappstellen 5 und 7 wird diese Veränderung tendenziell verstärken. Doch die Auswirkungen der geplanten Ausbaumaßnahmen haben lokal eine deutlich größere Auswirkung als die Veränderung, die sich während des Simulationszeitraumes aus einer Variation der Umlagerungsstrategie ergeben.

Im Bereich des Emden Fahrwassers ergibt sich ein überwiegend erhöhter Netto-Schwebstofftransport. Dies wird hauptsächlich durch die Erhöhung der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Querschnittseinengung durch die Buhnen bei Ems-KM 47.0 verursacht (Bild 38 und Bild 39). Dadurch gelangt mehr Sediment in Suspension und verstärkt sowohl den Ebbstromtransport wie auch den Flutstromtransport. Die Wendestelle und die vertieften Bereiche der Fahrrinne führen hingegen zu einer Reduktion der Schwebstoffkonzentration. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Schwebstoffkonzentration für Szenario 0II sind in Bild 73 flächenhaft dargestellt. Die Erhöhung stromab der Engstelle wie auch die Verringerung stromauf im Bereich der Fahrrinne und der Wendestelle ist gut zu erkennen.

Das Muster der Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten zeigt sich auch bei den in Bild 74 beispielhaft dargestellten ausbaubedingten Änderung des Netto-Geschiebetransportes für Szenario CII. Der Geschiebetransport spielt in der Realität dort keine Rolle, doch diese Analysegröße wurde hier mit aufgeführt, da sie einen Hinweis auf die zu erwartende morphodynamische Reaktion liefert. Neben der schon beschriebenen verstärkten Erosion bei der Querschnittseinengung ist die Reduktion der Transportrate im Bereich der Wendestelle die wichtigste Veränderung, da hier unmittelbar mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden muss.

In Bild 75 ist die Tiefenänderung für das Szenario 0II am Ende des Simulationszeitraumes dargestellt. Die durch die Baggeroperation vertiefte Fahrrinne ist ebenso deutlich zu erken-



nen wie die Depositionszone im südlichen Teil der Wendestelle. Auch im Vorhafen von Emden und im Bereich der Bühnenfelder werden Sedimente abgelagert. Ein nahezu identisches Bild ergibt sich für die Tiefenänderung des Szenario CII (Bild 76). Zusätzlich ist die Ablagerung im Bereich der Klappstelle K2 deutlich zu erkennen. Eine morphodynamische Reaktion stromauf oder stromab der Klappstelle ist bei dieser Skalierung nicht zu erkennen.

Der geplante Ausbau hat auf die Wirksamkeit der hier untersuchten Klappstellen 5, 7 und K2 (Dollartmund) kaum einen Einfluss.

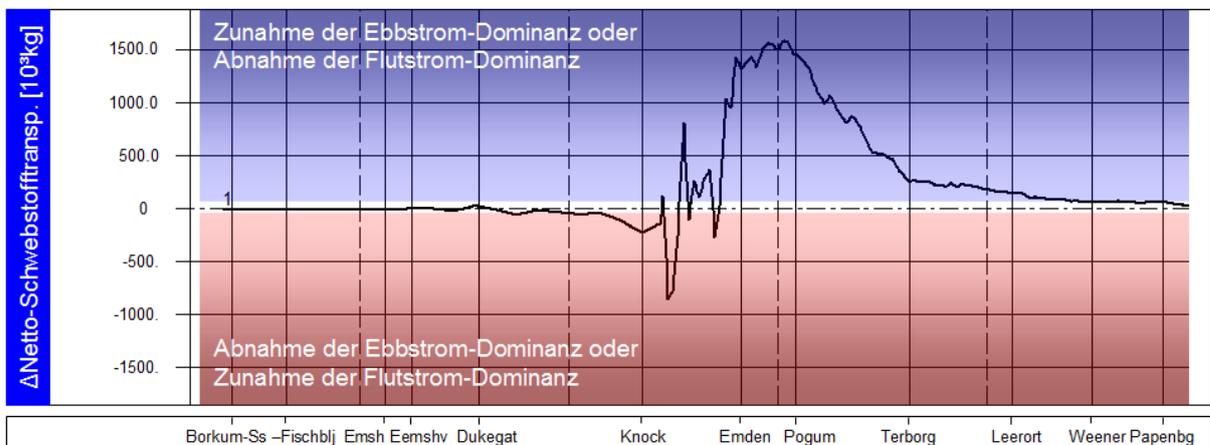
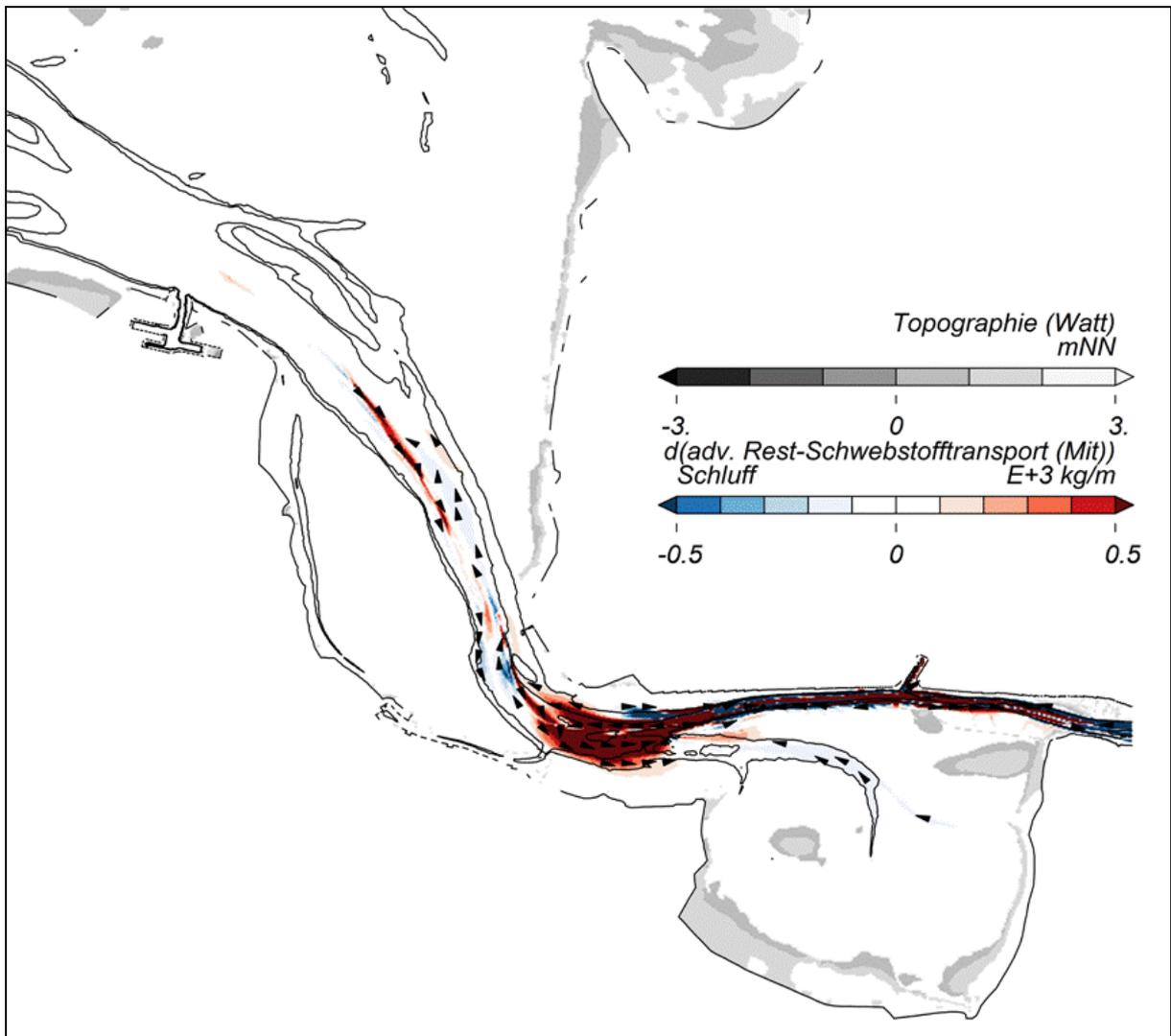


Bild 71: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Schwebstofftransportes für Szenario 0II, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt. Die Farbklassenbreite beträgt 100 kg/m , Änderungen kleiner als $\pm 100 \text{ kg/m}$ werden nicht dargestellt.

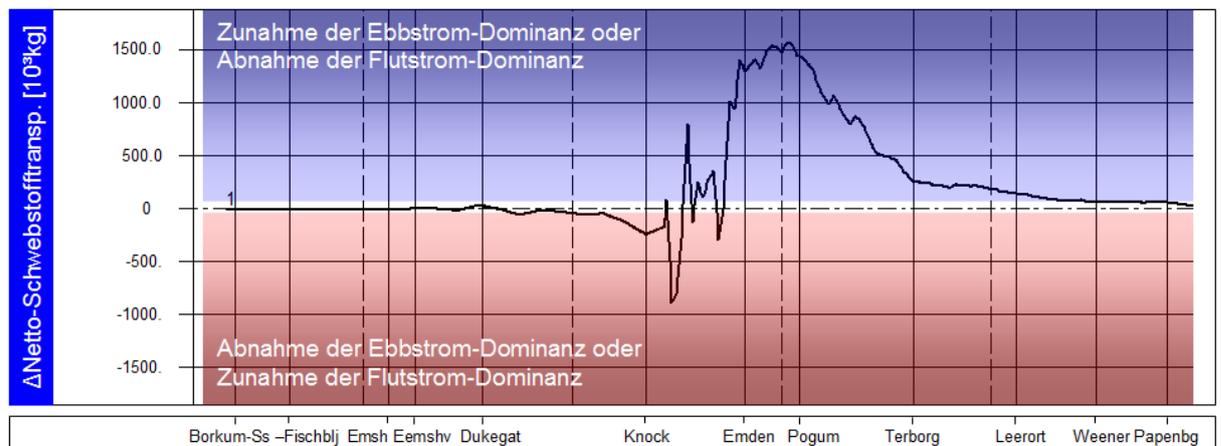
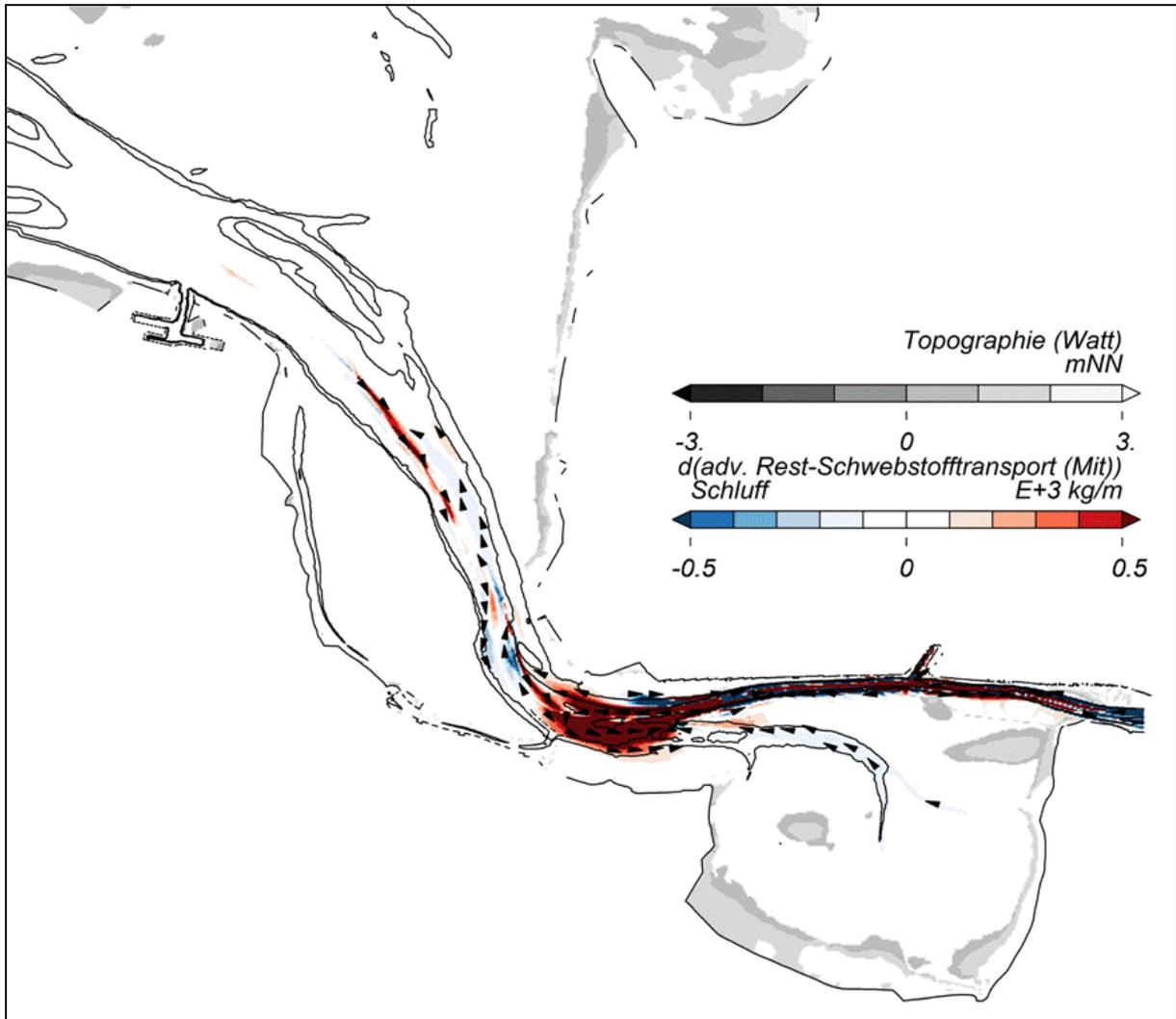


Bild 72: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Schwebstofftransportes für Szenario CII, oben flächenhaft und unten auf den Querprofilen integriert dargestellt.

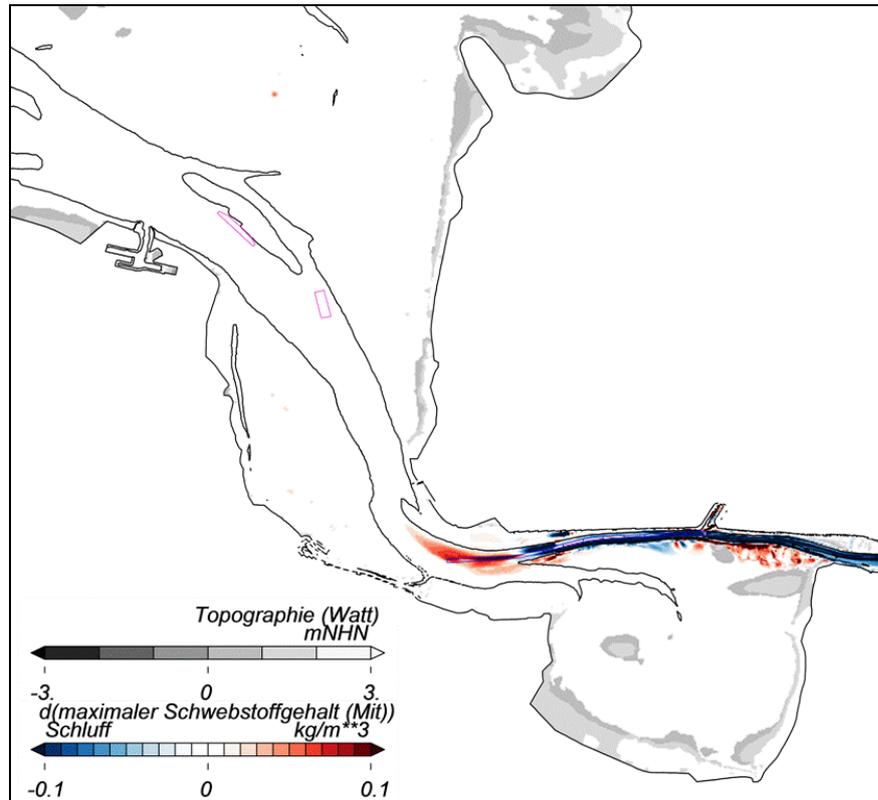


Bild 73: Ausbaubedingte Änderung der maximalen Schwebstoffkonzentration für Szenario 0II. Die Farbklassenbreite beträgt 0.01 kg/m^3 , Änderungen kleiner als $\pm 0.02 \text{ kg/m}^3$ werden nicht dargestellt.

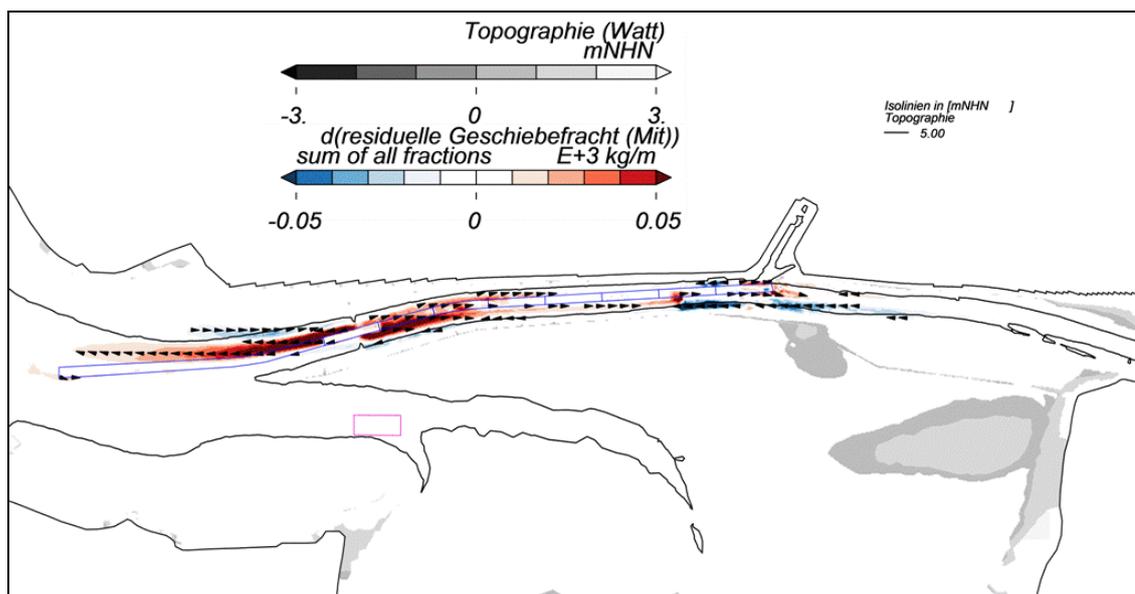


Bild 74: Ausbaubedingte Änderung des Netto-Geschiebetransportes für Szenario CII im Bereich des Emders Fahrwassers. Die Farbklassenbreite beträgt 10 kg/m , Änderungen kleiner als $\pm 10 \text{ kg/m}$ werden nicht dargestellt.

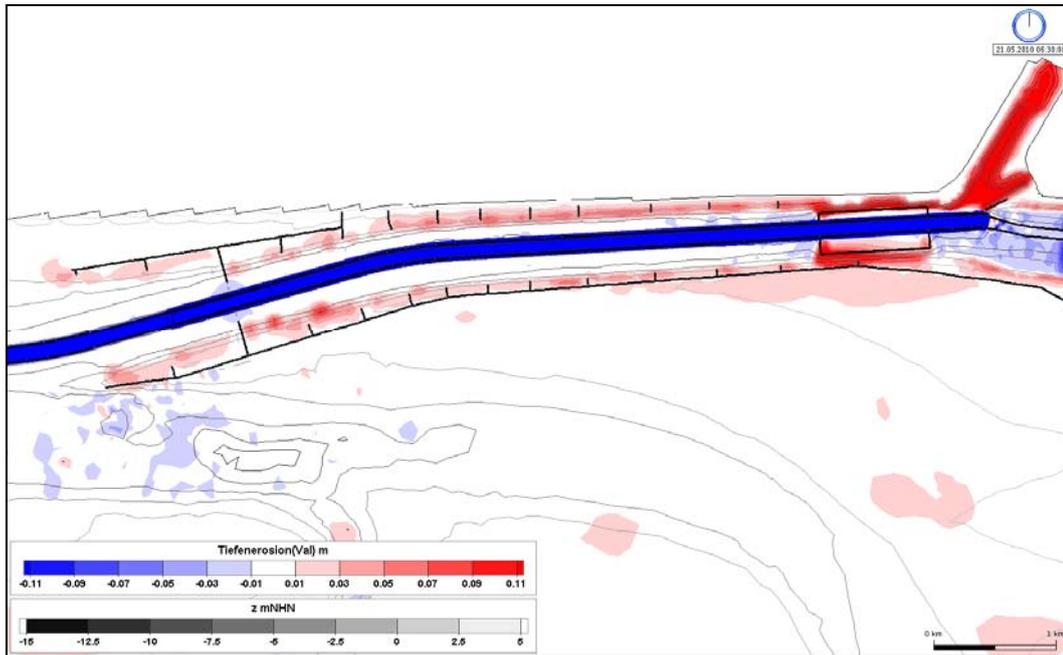


Bild 75: Tiefenänderung für das Szenario 0II am Ende des Simulationszeitraumes. Die durch die Baggeroperationen vertiefte Fahrrinne ist ebenso deutlich zu erkennen wie die Depositionszone im südlichen Teil der Wendestelle.

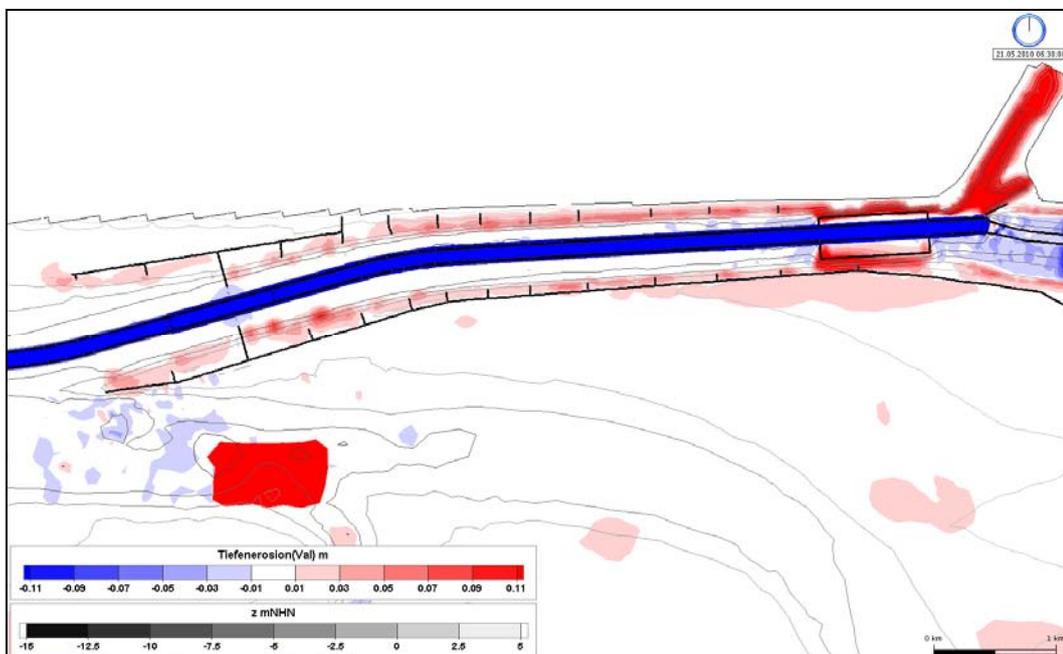


Bild 76: Tiefenänderung für das Szenario CII am Ende des Simulationszeitraumes. Die Änderungen im Bereich der Fahrrinne sind nahezu identisch wie im Szenario 0II. Zusätzlich ist die Ablagerung im Bereich der Klappstelle K2 deutlich zu erkennen.

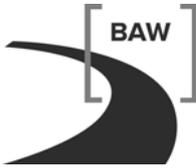
10.6 Wirkung des Ausbaus auf die Baggermengen

Eine exakte Berechnung der zukünftigen Sedimentations- und Erosionsbereiche – und damit auch der Baggermengen - ist nicht möglich. Dies ergibt sich einerseits aus den Modellunschärfen und andererseits aus der Unkenntnis der hydrologischen Verhältnisse in den Jahren und Jahrzehnten nach dem Ausbau. Daher erfolgt die Abschätzung der voraussichtlichen Baggermengenentwicklung bei Realisierung des Vorhabens und der langfristigen morphologischen Veränderungen im Bereich der Unter- und Außenems sowie der Zufahrten zu den Häfen anhand der zuvor beschriebenen Modellergebnisse. Die Veränderungen im Wasserstand, in den Strömungsgeschwindigkeiten und in den Schwebstoffkonzentrationen führen zu einem veränderten Schwebstofftransport, der hier zur Abschätzung der Baggermengenentwicklung genutzt wird.

In Kapitel 5.4.3 wurde nachgewiesen, dass das Modell die Nettotransporte stromauf und stromab des Haupteingriffsgebietes Gatjebogen/Emder Fahrwasser zufriedenstellend genau prognostiziert. Zwischen Eemshaven und Knock nimmt der residuelle Schwebstofftransport von ca. 10.000 t/Tide auf etwa 2.000 t/Tide ab. Im Übergang zur Unterems liegt der residuelle Transport oberwasserabhängig bei ca. 5.000-7.000 t/Tide. Dazwischen liegt das Emders Fahrwasser, in dem die wesentlichen Vertiefungen vorgesehen sind (Bild 29).

Die ausbaubedingten Veränderungen des Schwebstofftransportes (Bild 54) zeigen eine Verstärkung des flutstromorientierten Nettotransportes im Bereich Knock von ca. 100 t/Tide an. Im Übergang zur Unterems wird hingegen der Nettotransport durch die Maßnahmen im Emders Fahrwasser (Vertiefung, Verlängerung der Buhnen, Wendestelle) um ca. 500 t/Tide reduziert. Beide betrachteten Bilanzprofile weisen auf eine Erhöhung der Baggermengen im Emders Fahrwasser um etwa 10% hin: Es kommt mehr von Unterstrom herein und es geht weniger nach Oberstrom hinaus. Innerhalb des Emders Fahrwassers werden sich durch die Maßnahmen Baggerschwerpunkte verändern. Im Bereich der Querschnittseinengung durch die Buhnen werden die Baggermengen etwas sinken, sofern die hydraulische Wirkung, so wie sie hier festgestellt wurde, erhalten bleibt. Weiter oberhalb im Bereich der neuen Wendestelle und weiter unterhalb im Bereich Gatjebogen werden die Unterhaltungsaufwendungen jedoch deutlich ansteigen.

Für die Unterems weisen die Ergebnisse als unmittelbare Systemreaktion zunächst auf einen geringeren Sedimenteintrag hin. Das Emders Fahrwasser insgesamt wirkt als Sedimentfalle, was sich für die Unterems aber nur dann als vorteilhaft erweisen würde, wenn dieser Abschnitt konsequent in der Art unterhalten wird, dass die Schwebstoffkonzentrationen dauerhaft verringert werden. Akkumulieren jedoch Sedimente im Emders Fahrwasser im Laufe der Zeit derart, dass die Schwebstoffkonzentrationen wieder zunehmen, werden auch die Unterhaltungskosten in der Unterems als unmittelbare Folge weiter ansteigen.



Im Bereich Gatjebogen muss ebenfalls mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden, da dieser Bereich am stärksten vertieft wird und sowohl von Unterstrom als auch aus dem Bereich der Querschnittseinengung vermehrt Sedimente eingetragen werden. Die ausbaubedingten Veränderungen der Baggermengen in der Außenems unterhalb des Gatjebogens sind deutlich kleiner. Bild 71 und Bild 72 zeigen die ausbaubedingten Änderungen des Netto-Schwebstofftransportes unter Berücksichtigung verschiedener Umlagerungsszenarien. Im Bereich südlich der Unterbringungsorte wird der Flutstromtransport etwas verstärkt, so dass stromauf dieses Bereiches die Unterhaltungsbaggermengen ansteigen können.

Das zukünftige Sedimentmanagement wird bei gleichbleibender Strategie insgesamt um ca. 10% erhöhte Baggermengen bewältigen müssen. Die Baggerschwerpunkte innerhalb des Emders Fahrwassers verschieben sich. Im Bereich der Wendestelle und im Gatjebogen werden die Baggermengen stärker ansteigen. Die Kapazität der Klappstellen 5 und 7 ist für eine entsprechend stärkere Beaufschlagung ausreichend. Dadurch wird jedoch der Sedimentkreislauf weiter verstärkt.

Langfristige großräumige morphologische Veränderungen im Bereich der Unter- und Außenems sowie der Zufahrten zu den Häfen wird der geplante Ausbau der Außenems bis Emden nicht verursachen. Die unmittelbaren Auswirkungen dieser Maßnahme sind im Wesentlichen lokal begrenzt. Die langfristigen ausbaubedingten morphologischen Veränderungen hängen primär vom zukünftigen Handeln des Sedimentmanagements ab.

11 Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Wassertemperatur

Die Steuerung der Wassertemperatur im HN-Modell wird in den Szenarien M1 und M2 im Vergleich zu S1 konzeptionell unterschiedlich behandelt (s.a. Kapitel 6.1.5).

- Mit den Szenarien M1 und M2 kann die ausbaubedingte Veränderung der Ausbreitung der Kraftwerks-Kühlwasserfahnen festgestellt werden. Da sich die Szenarien M1 und M2 in diesem Punkt nicht unterscheiden, wird im Folgenden nur Szenario M1 betrachtet.
- Im Szenario S1 wird ein sommerliches Wassertemperatur-Szenario eingesteuert. Mit dieser Temperatursteuerung kann die ausbaubedingte Veränderung der Wassertemperatur während einer sommerlichen Warmperiode festgestellt werden.

Das Ergebnis der Analyse sowohl im Längsprofil in Fahrrinnenmitte (Bild 77, Bild 78 und Bild 79) als auch in der Fläche (Bild 80, Bild 81 und Bild 82) ist, dass die ausbaubedingte Änderung der Wassertemperatur im Ems-Ästuar den Schwellenwert von $\pm 0,1$ K nicht erreichen oder überschreiten wird.

Salzgehalt und Wassertemperatur haben aus Sicht des HN-Modells eine gemeinsame Eigenschaft: Sie sind sogenannte passive Tracer, d.h. sie werden mit der Strömung transportiert. Die Strömungsgeschwindigkeiten haben sich ausbaubedingt verändert und entsprechend haben sich auch die lagrangeschen Wege ausbaubedingt verlängert oder verkürzt. Trotzdem sind die ausbaubedingten Änderungen für die Wassertemperatur deutlich kleiner als für den Salzgehalt, weil der horizontale Gradient im Ems-Ästuar für die Wassertemperatur deutlich kleiner ist als für den Salzgehalt. Das bedeutet, dass z.B. eine Verlängerung eines lagrangeschen Weges trotzdem nicht nennenswert zu einer Veränderung der Wassertemperatur führt, weil auch an einem Ort z.B. 500 m weiter stromauf oder stromab vom ursprünglichen Anfangspunkt eines lagrangeschen Flut- oder Ebbeweges annähernd die gleiche Wassertemperatur vorherrscht, aber nicht der gleiche Salzgehalt.

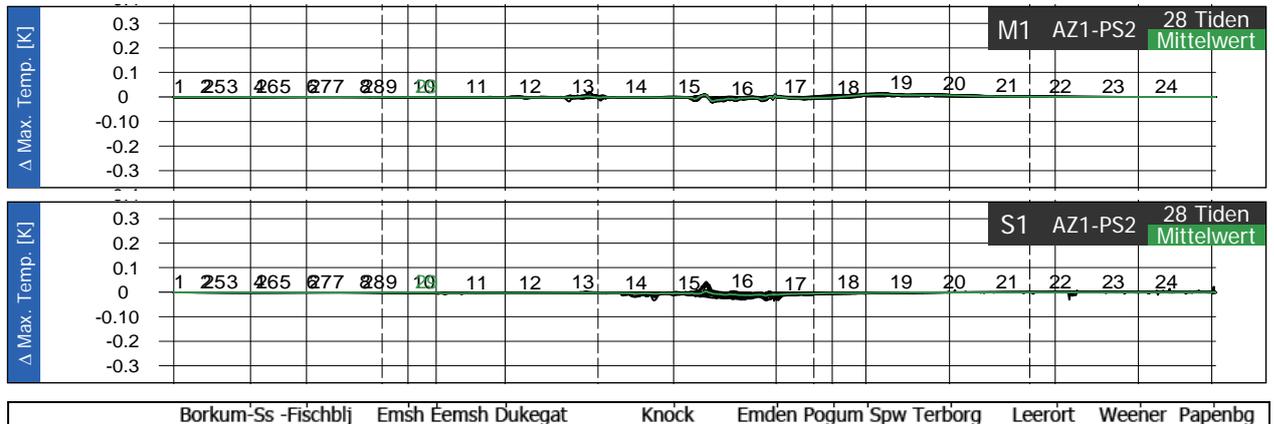


Bild 77: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten maximalen Wassertemperatur in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums (Schwarz) und die mittlere Änderung (Grün) für Szenario M1 (oben) und für Szenario S1 (unten).

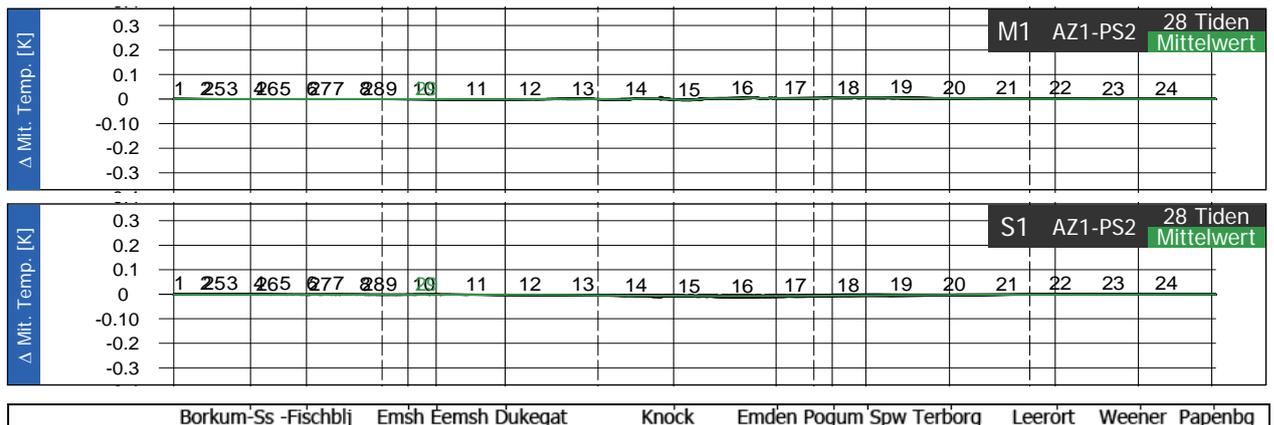


Bild 78: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Wassertemperatur für Szenario M1 (oben) und für Szenario S1 (unten).

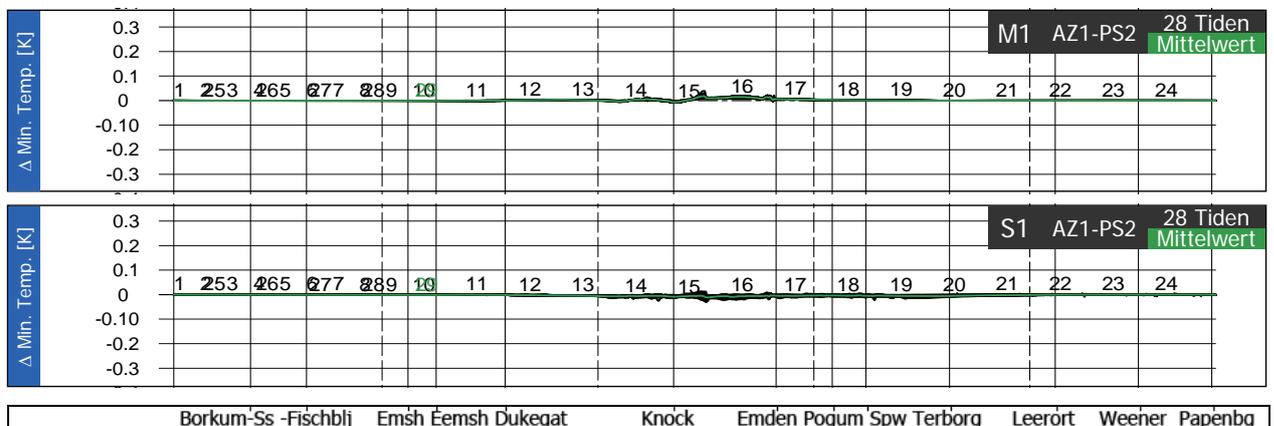


Bild 79: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten minimalen Wassertemperatur für Szenario M1 (oben) und für Szenario S1 (unten).

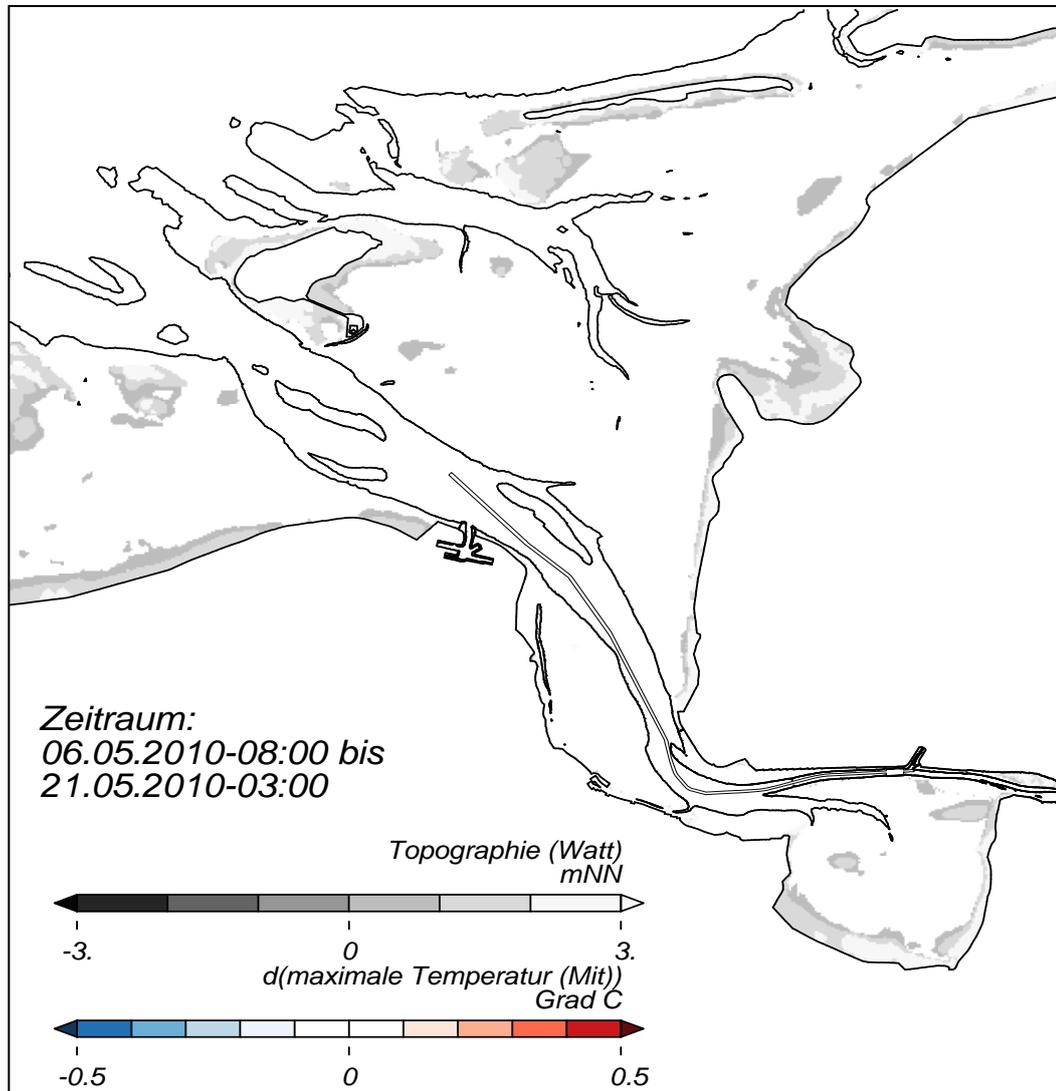


Bild 80: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten maximalen Wassertemperatur zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 K und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ K werden nicht dargestellt.

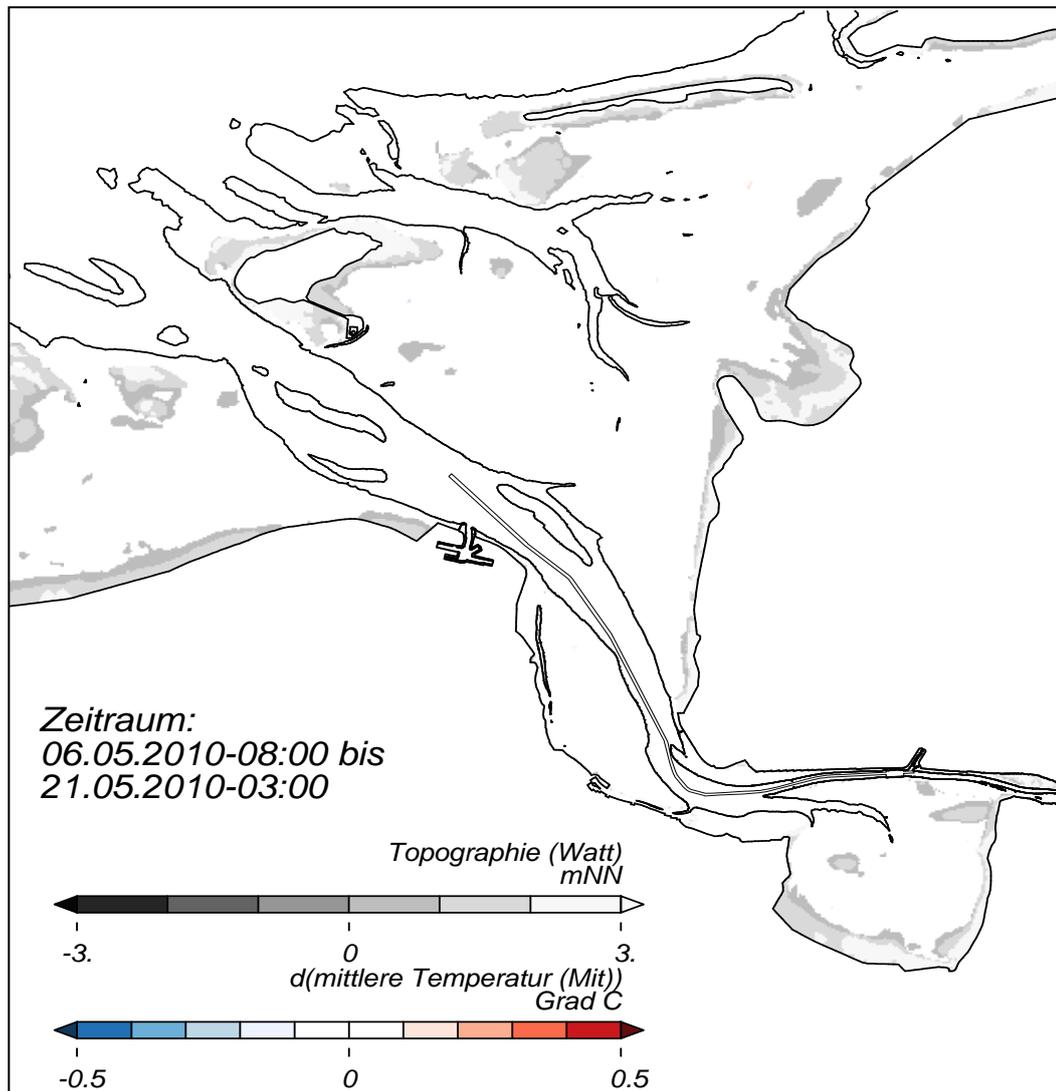


Bild 81: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten mittleren Wassertemperatur zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 K und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ K werden nicht dargestellt.

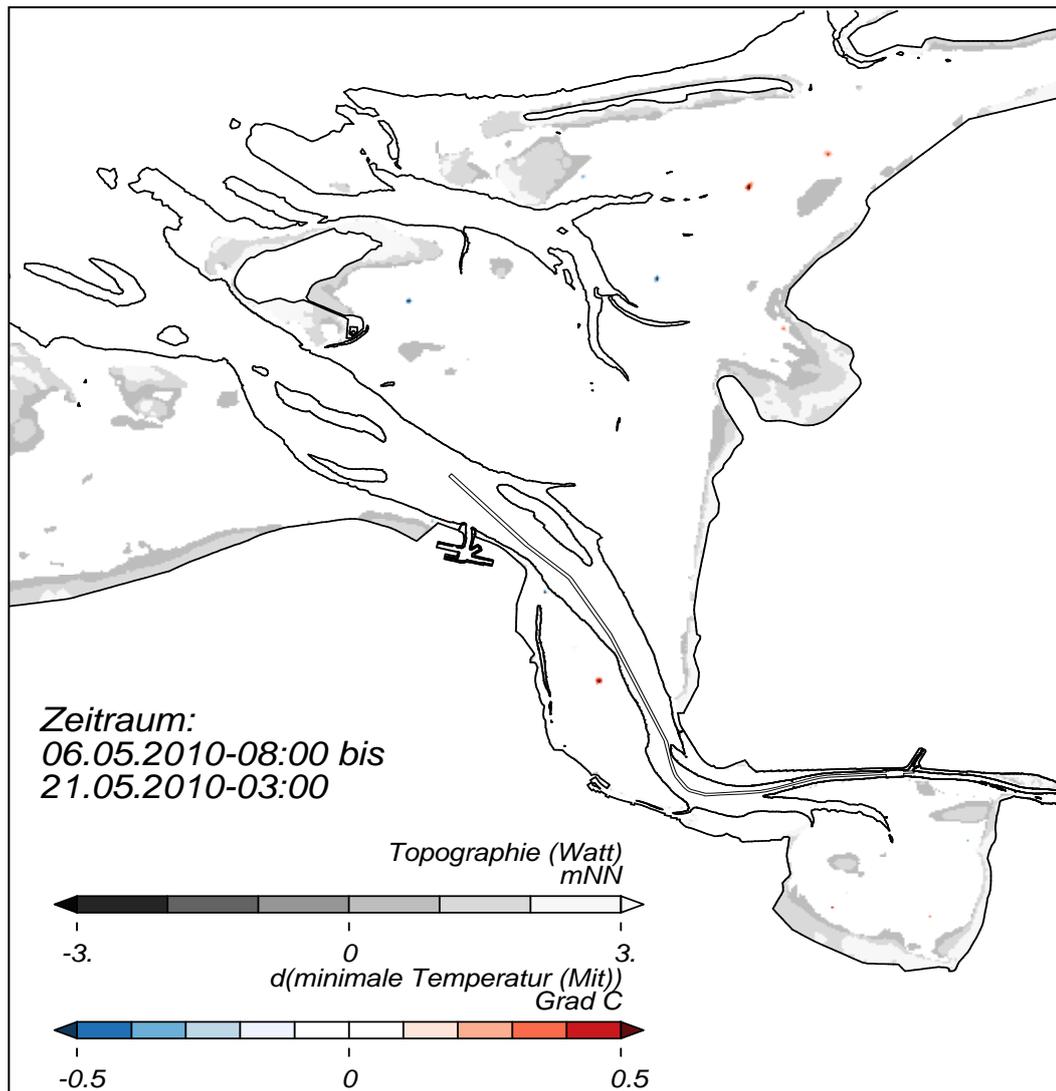
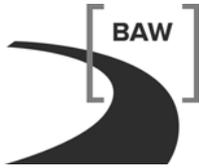


Bild 82: Ausbaubedingte Änderung der tiefengemittelten minimalen Wassertemperatur zwischen Borkum und Pogum für den häufigsten Oberwasserzufluss (M1). Der Farbverlauf ist so definiert, dass Zunahmen in Rot und Abnahmen in Blau dargestellt sind. Die Farbklassenbreite beträgt 0,1 K und Änderungen kleiner als $\pm 0,1$ K werden nicht dargestellt.



12 Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Seegang

12.1 Mathematische Verfahren

Zur Bestimmung der ausbaubedingten Änderungen des Seegangs in der Außenems wird das numerische Verfahren *Unk* (K-Modell siehe Schneggenburger 1998) eingesetzt. Um die Wechselwirkung des Seegangs mit der Gezeitendynamik bei der Untersuchung zu berücksichtigen, wird das Seegangsmodell *UnK* (*K-Modell*) mit dem hydronumerischen Modell (HN-Modell) *UnTRIM* gekoppelt.

12.2 Seegangsmodell der Ems

Das Gebiet des Seegangsmodells der Außenems umfasst einen Bereich zwischen den Gauß-Krüger-Koordinaten 2525384 / 5971581 im Nordwesten (Deutsche Bucht nördlich Borkum) und 2587259 / 5900652 im Südosten (Nieuwe Statenzijl). Der seeseitige Rand liegt nördlich der Inselkette Simonszand – Borkum – Juist – Norderney (Bild 83).

Das Gebiet ist mit einem quasi-regelmäßigen Vierecksnetz überzogen, das eine an die Topographiegradienten angepasste Auflösung erlaubt und so einen wirtschaftlichen Umgang mit Speicherplatz und Rechenzeit ermöglicht. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt 50.145. Die Kantenlängen des Netzes variieren von ca. 35 m im Bereich des Emders Fahrwassers bis zu gut 600 m am seeseitigen Modellrand. Die häufigste Kantenlänge der Elemente beträgt ca. 100 m. Die Fläche der Elemente variiert dabei von 1500 m² bis zu 0,3 km², wobei die häufigste Elementfläche ca. 9500 m² beträgt. Die Topographie des Seegangsmodells basiert auf Messdaten aus dem Jahr 2010.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen für den Zeitraum vom 2.10.2009 bis zum 22.10.2009 werden mit dem HN-Modell der Unter- und Außenems Simulationen durchgeführt. Diese Simulationen werden mit dem dreidimensionalen Modellverfahren *UnTRIM* auf einem unstrukturierten Gitter für den Ist-Zustand durchgeführt. Hierfür werden berechnete Windfelder aus dem Wettervorhersagemodell LME des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Ein Vergleich der im Modell verwendeten Windgeschwindigkeit mit der Messung für Borkum und Emden zeigt Bild 84 und Bild 85. Der Vergleich zeigt, dass die in die Simulation eingehenden Windgeschwindigkeiten größer sind als die gemessenen.

Diese Windfelder sowie die damit berechneten Wasserstände und die vertikal integrierten Strömungen gehen in die instationären Seegangsberechnungen ein. Die Randwerte zur Steuerung des Seegangsmodells am offenen seeseitigen Rand werden aus der lokalen Windgeschwindigkeit und den Windwirklängen (Fetch) bestimmt.

Im Untersuchungszeitraum wurden auf Borkum am 3.10.2009 Windgeschwindigkeiten bis zu 17 m/s und am 16.10.2009 bis zu 13 m/s gemessen (Bild 84). Bedingt durch diese meteorologischen Ereignisse stellten sich entsprechende Wasserstände am Pegel Borkum-Fischerbalje ein. So wurden dort am 4.10.2009 Wasserstände bis zu NHN +2,60 m gemessen und am 16.10.2009 bis zu NHN +1,90 m (Bild 86). Nicht nur diese Wasserstände sondern die insgesamt für den Untersuchungszeitraum benötigten Wasserstände werden durch das HN-Modell der Unter- und Außenems gut reproduziert (Bild 86, Bild 87).

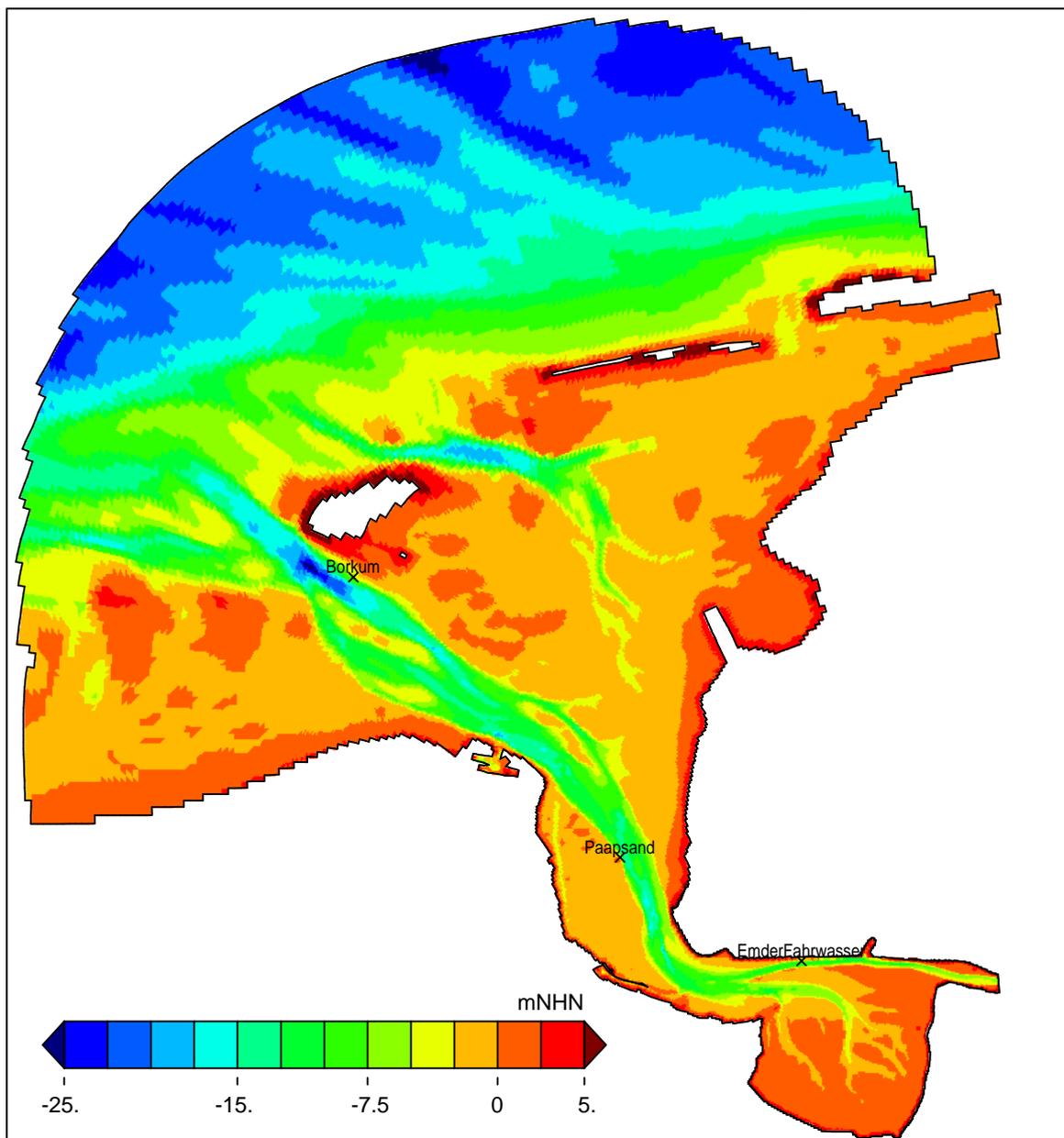


Bild 83: Topographie des Seegangmodells der Ems mit den Messstationen des Seegangs.

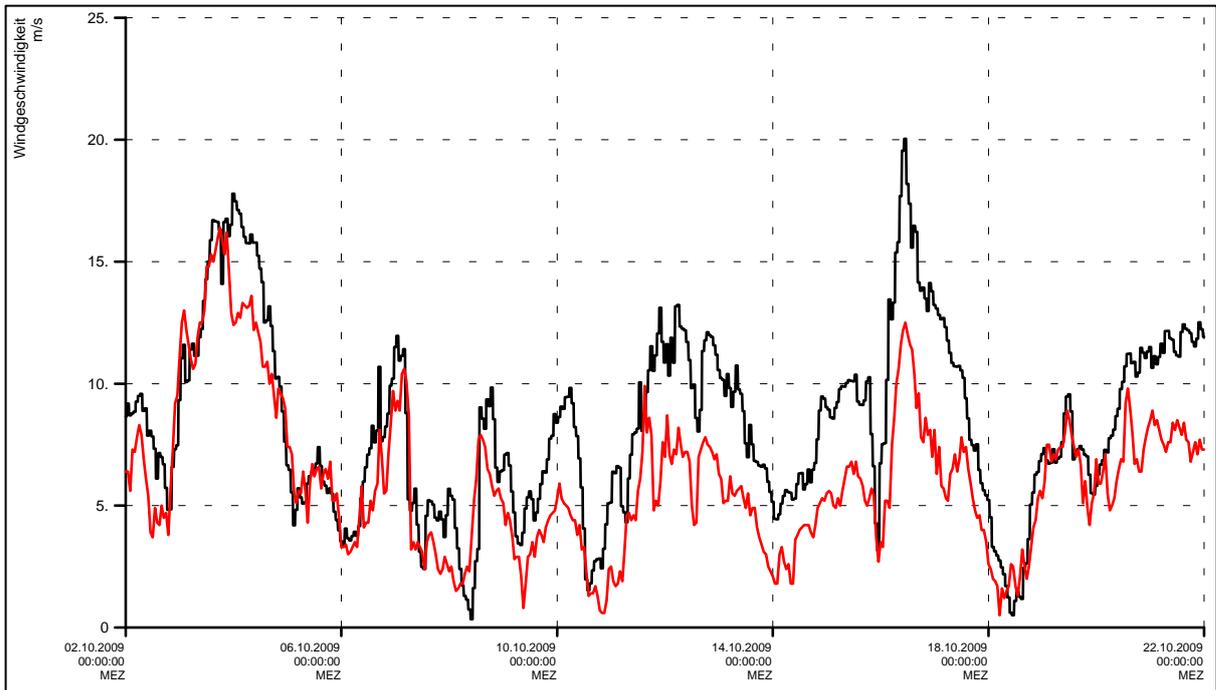


Bild 84: Gemessene (rot) und im Modell (schwarz) verwendete Windgeschwindigkeiten (m/s) bei Borkum für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.10.2009.

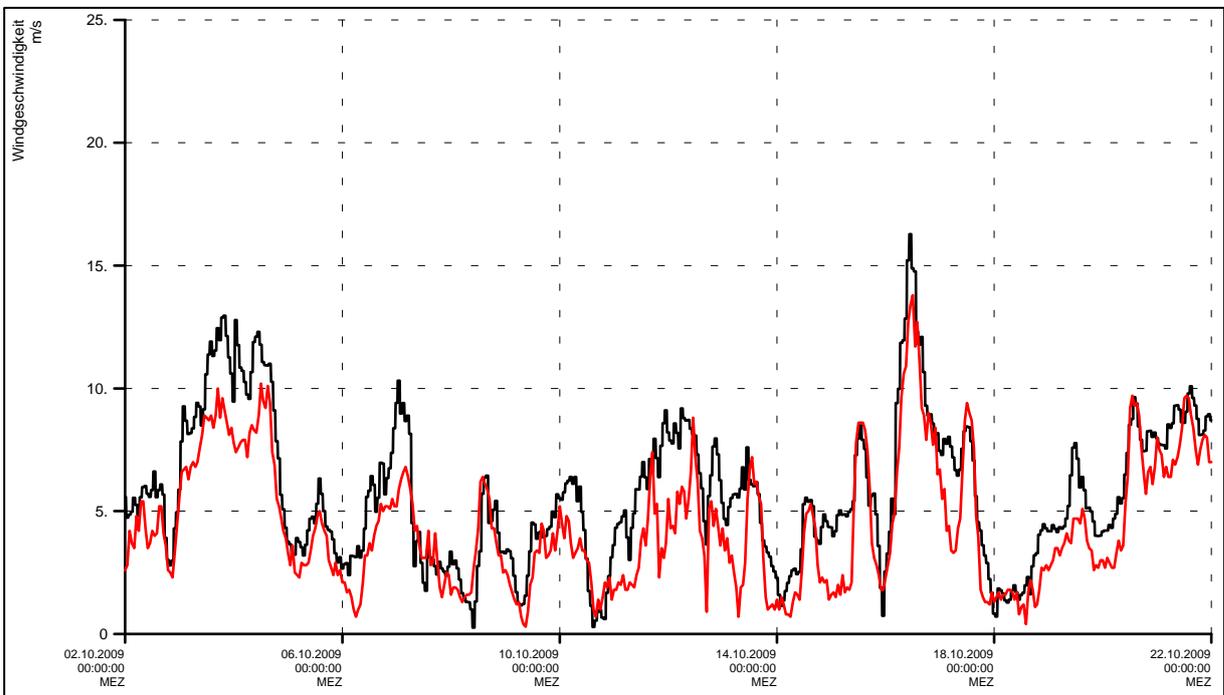


Bild 85: Gemessene (rot) und im Modell (schwarz) verwendete Windgeschwindigkeiten (m/s) bei Emden für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.10.2009.

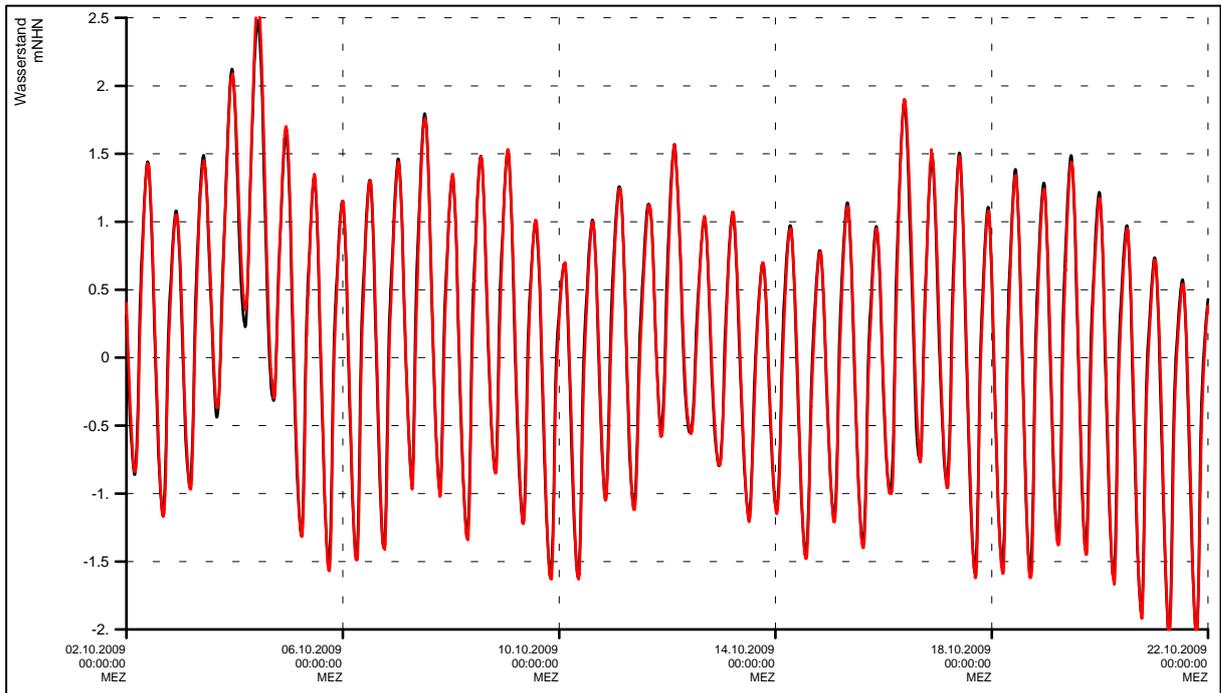


Bild 86: Gemessener (rot) und berechneter (schwarz) Wasserstand (m NHN) am Pegel Borkum Fischerbalje für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.10.2009.

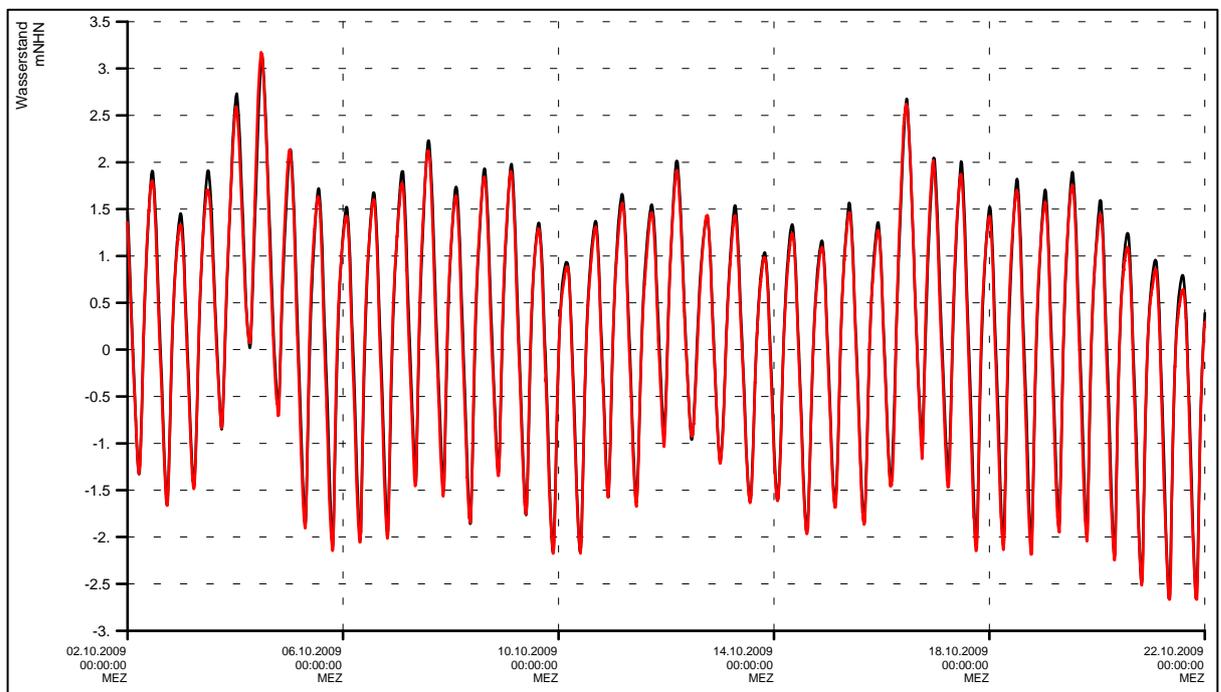


Bild 87: Gemessener (rot) und berechneter (schwarz) Wasserstand (m NHN) am Pegel Emden Neue Seeschleuse für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.10.2009.

12.3 Validierung des Seegangmodells

Die mathematischen Ansätze des k -Modells (k steht hierbei für Wellenzahl) sind auf Naturuntersuchungen, wie zum Beispiel das JONSWAP-Experiment, abgestimmt. Eine Kalibrierung des Modells mit Sohlrauigkeiten oder anderen Parametern ist nicht notwendig.

Für die Validierung des Seegangmodells stehen Daten für die Messstationen Borkum, Paapsand und Emden Fahrwassers (Bild 83) vom 2.10.2009 bis 22.10.2009 zur Verfügung (IMS, 2010). Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen signifikanten Wellenhöhen bzw. der Wellenperiode T_{m02} (Bild 88, Bild 89, Bild 90). Die Unterschiede zwischen Rechnung und Messung resultieren in erster Linie aus den in die Simulation eingehenden Windfeldern. Die Eingangsdaten zur Erstellung dieser Windfelder haben eine grobe räumliche und zeitliche Auflösung, wodurch die Unterschiede zwischen dem im Modell verwendeten Wind und dem gemessenen Wind insbesondere zu erklären sind.

Die in die Seegangssimulation eingehenden größeren Windgeschwindigkeiten (s.o.) führen im Vergleich mit den Messungen auch zu größeren berechneten Wellenhöhen. Dies trifft allerdings für die Messstation Borkum nur bedingt zu (Bild 88). Hier werden die Wellenhöhen eher unterschätzt, was in erster Linie auf den in das Untersuchungsgebiet einlaufenden Seegang zurückgeführt wird. Für diesen in der Nordsee entstandenen Seegang stehen keine Informationen zur Verfügung, so dass am offenen seeseitigen Rand der einlaufende Seegang aus der lokalen Windgeschwindigkeit und einer angenommenen Windwirklänge (Fetch) konstruiert werden musste.

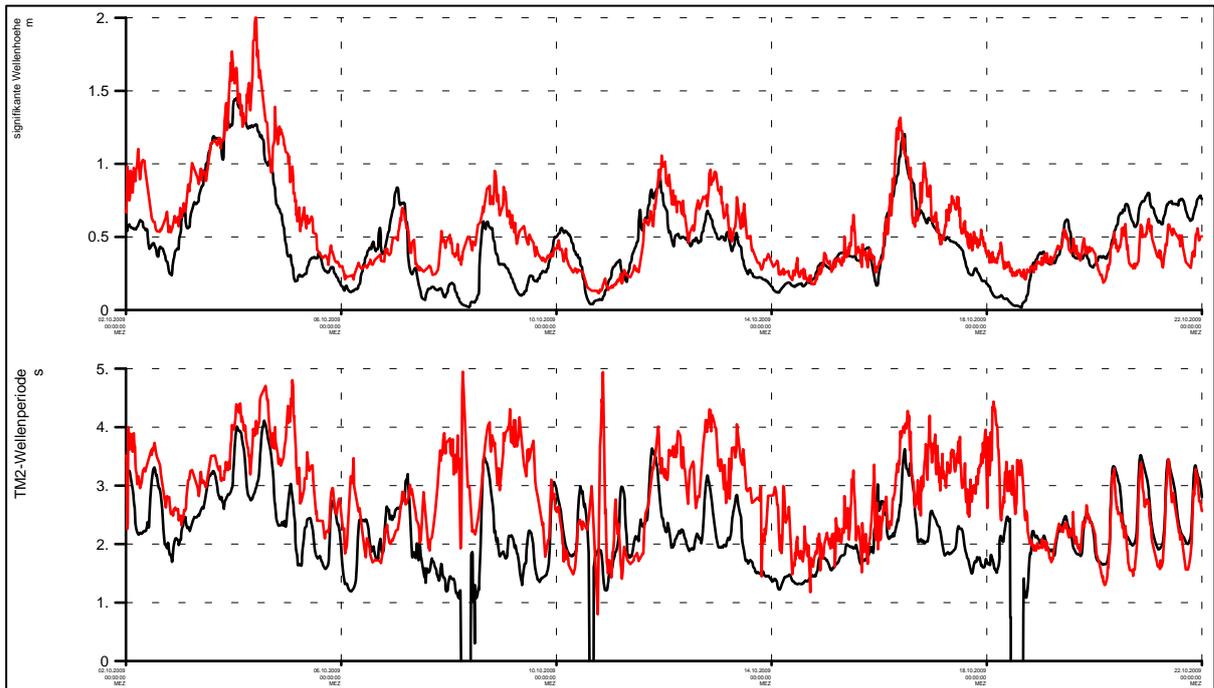


Bild 88: Vergleich von Messung (rot) und Rechnung (schwarz) für die Messstation Borkum für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.9.2009. Oben für die signifikante Wellenhöhe und unten für die Wellenperiode T_{m02} .

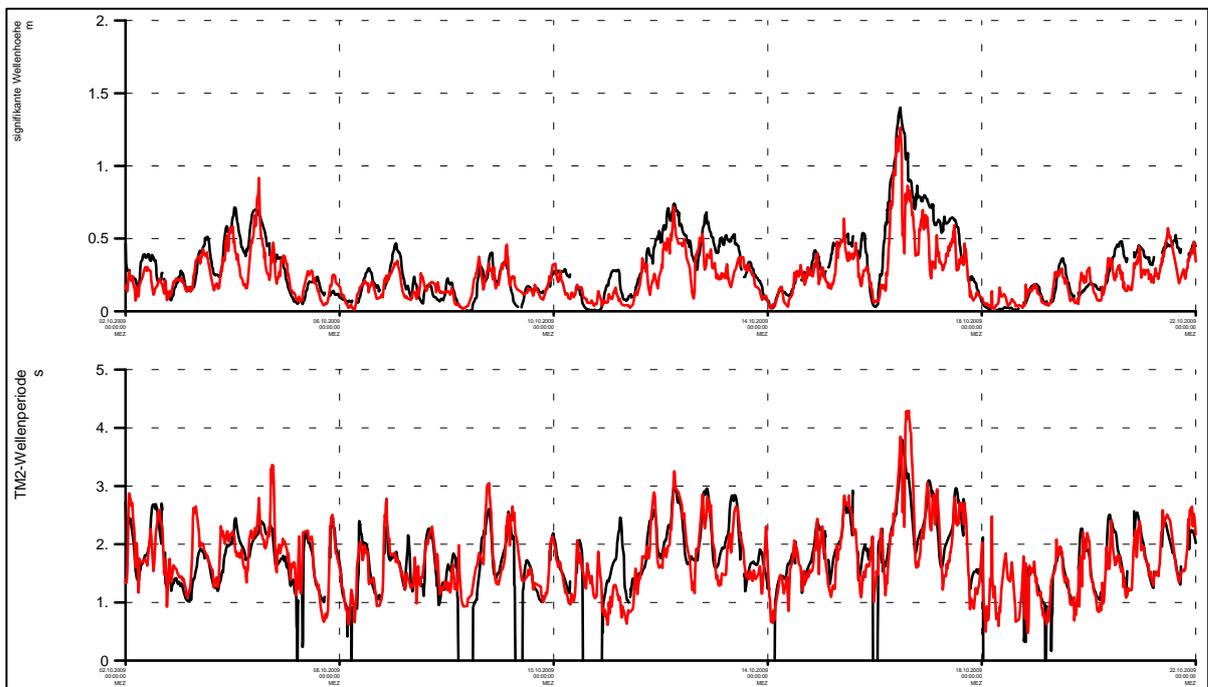


Bild 89: Vergleich von Messung (rot) und Rechnung (schwarz) für die Messstation Paapsand für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.9.2009. Oben für die signifikante Wellenhöhe und unten für die Wellenperiode T_{m02} .

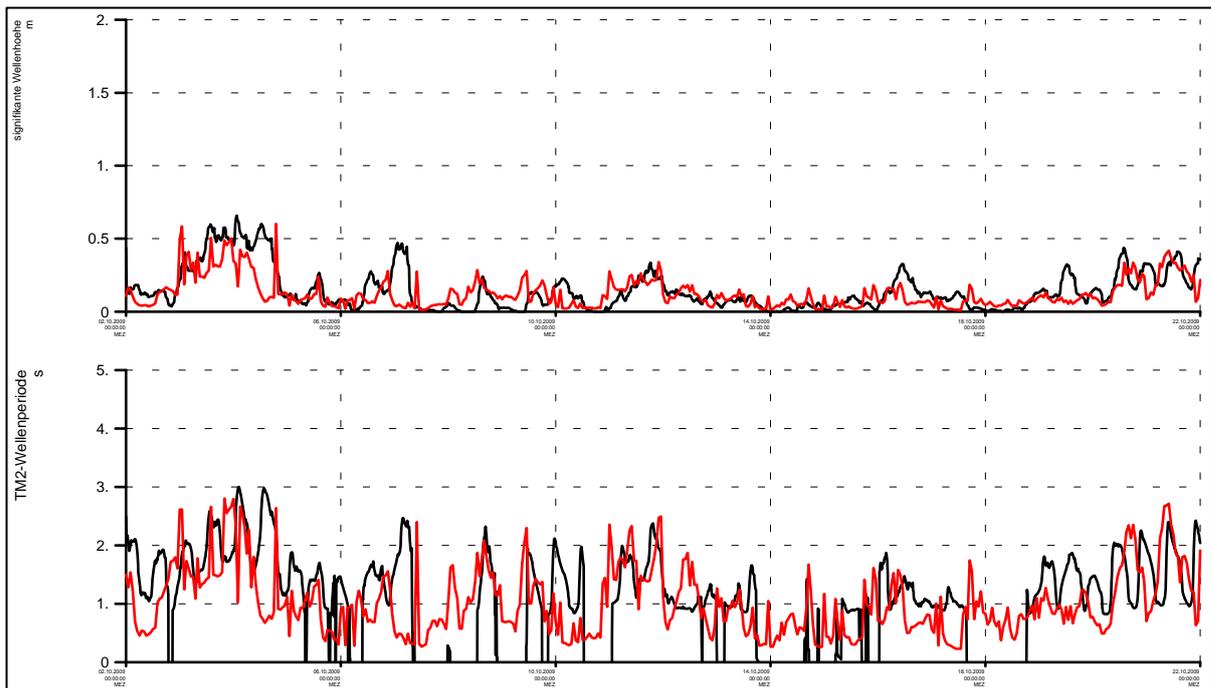


Bild 90: Vergleich von Messung (rot) und Rechnung (schwarz) für die Messstation Emden Fahrwasser für die Zeit vom 2.10.2009 bis zum 22.9.2009. Oben für die signifikante Wellenhöhe und unten für die Wellenperiode T_{m02} .

12.4 Ausbaubedingte Änderung des Seegangs

Die geplante Vertiefung der Außenems bis Emden verbunden mit einer Querschnittseinerung durch die Verlängerung der Buhnen 6/7 sowie einer Querschnittsaufweitung durch die geplante Wendestelle bei Emden (Bild 92) bewirkt eine Veränderung der Form der Tidekurve, eine Veränderung der Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle sowie eine Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten. Dadurch wird auch das lokale Seegangsklima beeinflusst werden. Um diese ausbaubedingte Änderung des lokalen Seegangs bestimmen zu können, wird das oben beschriebene Seegangsmodell der Ems an den planerischen Sollzustand PS2 angepasst. Dieser dient wiederum als Grundlage für die Herstellung des Ausbauzustands AZ1. Im Bild 91 ist die Modelltopographie des planerischen Sollzustandes PS2 für den Bereich des Emden Fahrwassers bis zur Knock exemplarisch dargestellt. Für dasselbe Gebiet sind im Bild 92 die geplanten topographischen Veränderungen für den Ausbauzustand AZ1 als Differenz zum planerischen Sollzustand zu sehen. Eine Abnahme der Wassertiefen ist in Rot und eine Zunahme der Wassertiefen in Blau aufgetragen. Die topographischen Veränderungen im Bereich der Fahrrinne und der Wendestelle sind genauso wie die Strombaumaßnahme deutlich im Bild 92 zu erkennen.

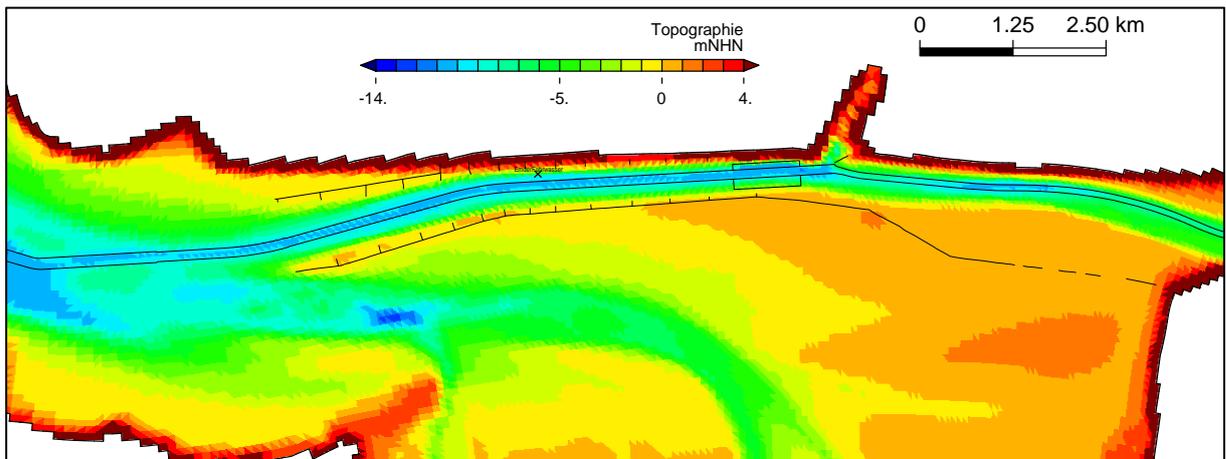


Bild 91: Topographie des planerischen Sollzustands PS2 für den Bereich des Emders Fahrwassers mit der Position der Seegangmessung.

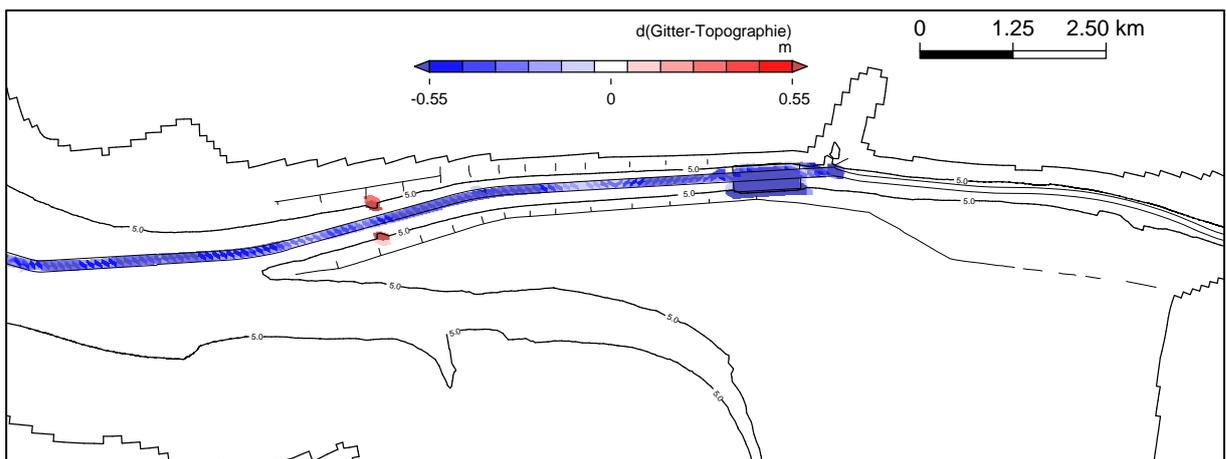


Bild 92: Differenztopographie Ausbauzustand – planerischer Sollzustand PS2.

Die Seegangssimulationen für den planerischen Sollzustand PS2 und den Ausbauzustand AZ1 werden genauso durchgeführt, wie für die Validierung des Seegangmodells für den Zustand 2010. Für diese beiden Zustände werden zuerst die Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten für den Zeitraum 2.10.2009 bis 22.10.2009 mit dem HN-Modell der Unter- und Außenems berechnet. Dann werden die Simulation des instationären Seeganges für den planerischen Sollzustand (PS2) sowie für den Ausbauzustand (AZ1) unter Berücksichtigung der berechneten Wasserstände und vertikal integrierten Strömungen zusammen mit dem Wind für denselben Zeitraum durchgeführt.

Um einen ersten Eindruck von den Auswirkungen des geplanten Ausbaus auf den Seegang zu bekommen, sollen die Zeitserien der Wellenhöhen an den Station Borkum (Bild 93), Paapsand (Bild 94) und Emders Fahrwasser (Bild 95) verglichen werden. Dafür werden die berechneten signifikanten Wellenhöhen für den Untersuchungszeitraum vom 2.10.2009 bis 22.10.2009 für den planerischen Sollzustand PS2 und den Ausbauzustand AZ1 graphisch dargestellt. Bei Borkum und Paapsand sind so gut wie keine Auswirkungen auf den Seegang zu erkennen. Die Unterschiede an der Station Emders Fahrwasser werden durch eine Differenzdarstellung zwischen dem Ausbauzustand AZ1 und dem planerischen Sollzustand PS2 im unteren Teil von Bild 95 verdeutlicht. Es gibt Zu- und Abnahmen, die dem Betrage nach kleiner als 0,06 m sind, in Abhängigkeit des jeweiligen meteorologischen Ereignisses. Dieselbe Art der Darstellung ist auch für die Wellenperiode T_{m02} an der Messstation Emders Fahrwasser gewählt worden (Bild 96). Es gibt auch hier Zu- und Abnahmen, die dem Betrage nach kleiner als 1 s sind, in Abhängigkeit des jeweiligen meteorologischen Ereignisses.

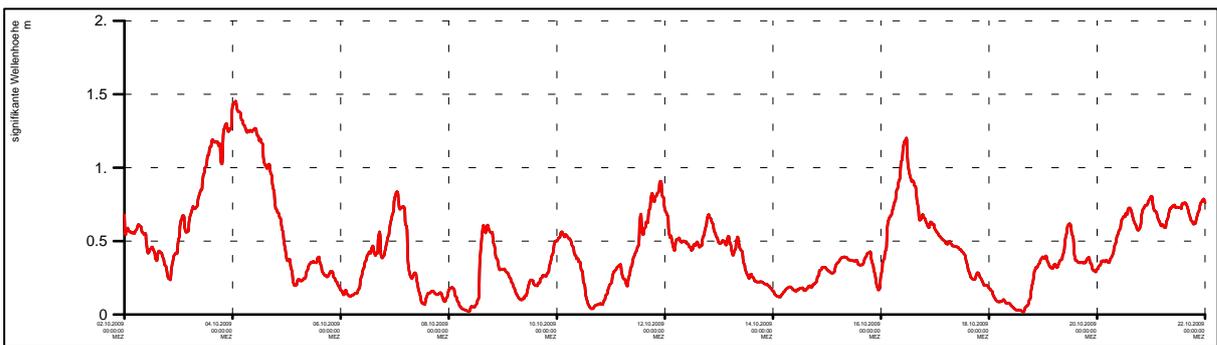


Bild 93: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Borkum vom 2.10.2009 bis 22.10.2009. In Schwarz für den planerischen Sollzustand PS2 und in Rot für den Ausbauzustand AZ1 mit Querschnittseinengung.

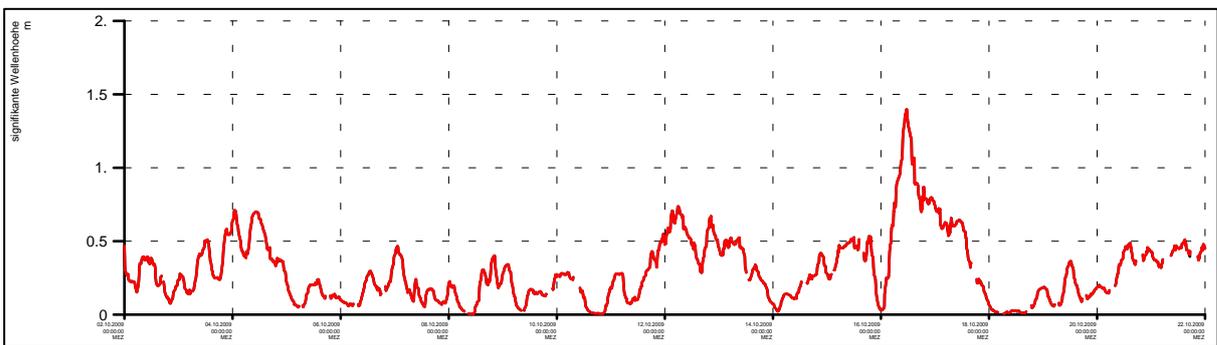


Bild 94: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Paapsand vom 2.10.2009 bis 22.10.2009. In Schwarz für den planerischen Sollzustand PS2 und in Rot für den Ausbauzustand AZ1 mit Querschnittseinengung.

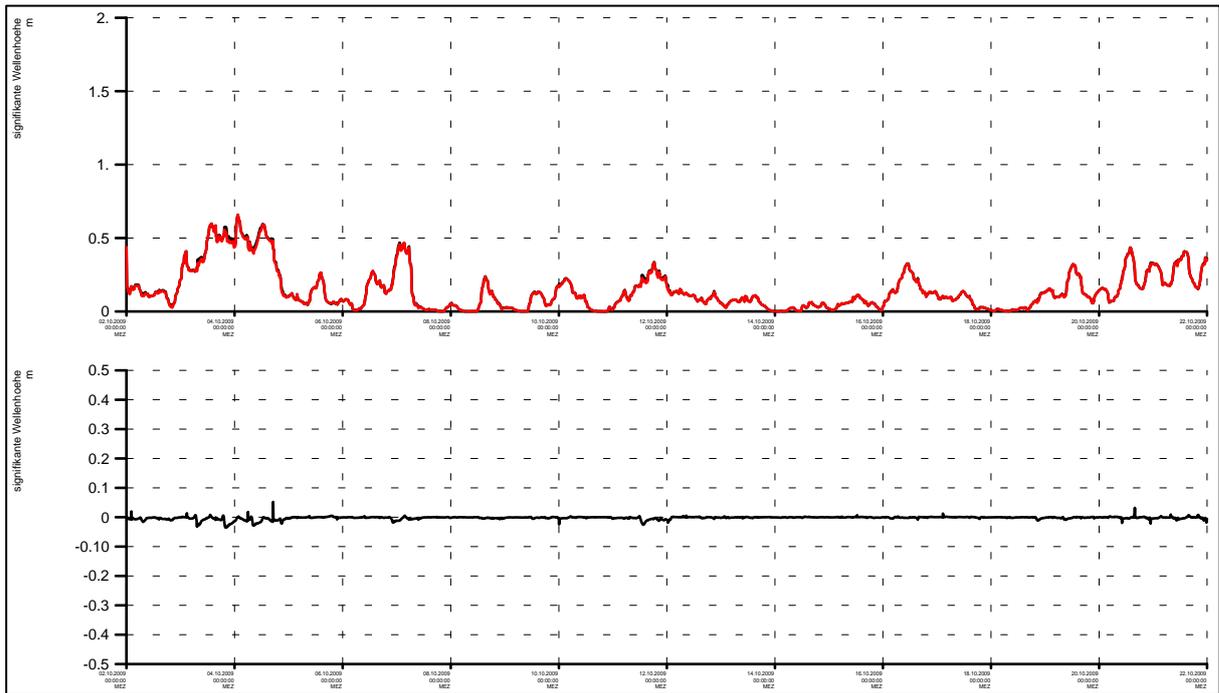


Bild 95: Signifikante Wellenhöhe an der Messstation Emders Fahrwasser vom 2.10.2009 bis 22.10.2009 (Oben). In Schwarz für den planerischen Sollzustand PS2 und in Rot für den Ausbauzustand AZ1. Darunter sind die Differenzen zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Sollzustand.

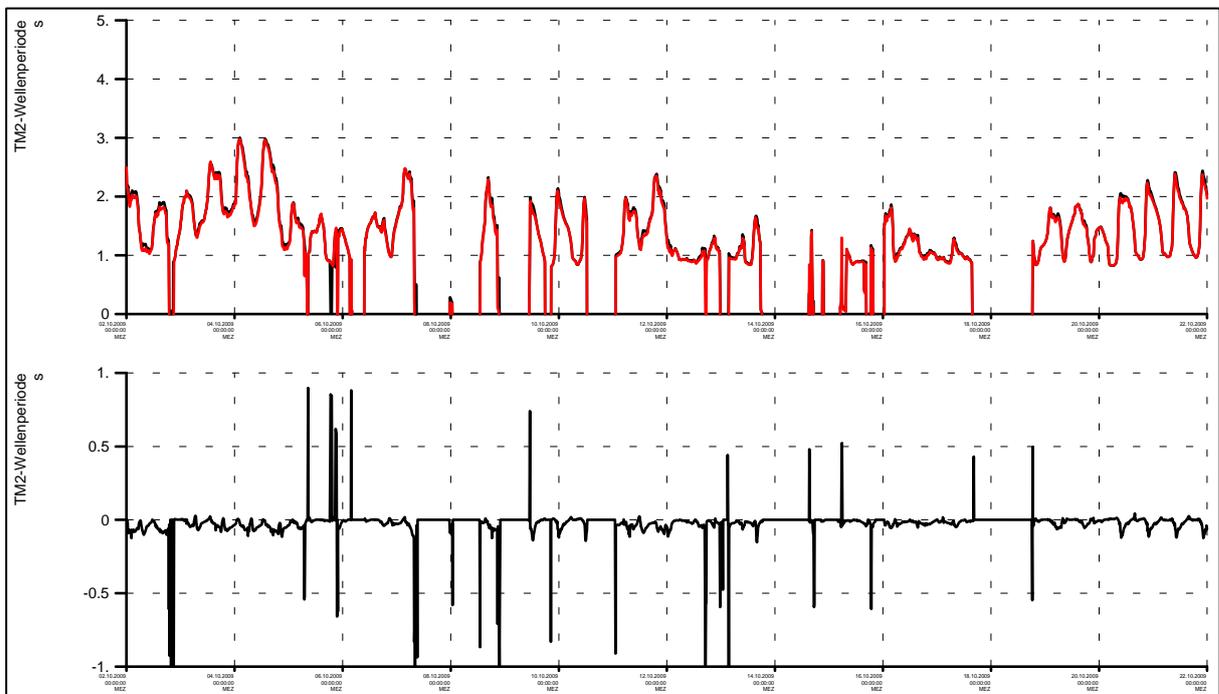


Bild 96: Wellenperiode T_{m02} an der Messstation Emders Fahrwasser vom 2.10.2009 bis 22.10.2009 (Oben). In Schwarz für den planerischen Sollzustand PS2 und in Rot für den Ausbauzustand AZ1. Darunter sind die Differenzen zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Sollzustand.

Die flächenhafte Analyse bestätigt den Eindruck, der sich aus diesen Vergleichen ergibt: die Auswirkungen sind auf den Bereich des Emders Fahrwassers begrenzt. Deshalb wird im Folgenden die Darstellung der flächenhaften Analyseergebnisse auf den Bereich um das Emders Fahrwasser beschränkt. Hierfür wird die maximale signifikante Wellenhöhe (höchster Wert des Untersuchungszeitraums) für den planerischen Sollzustand ermittelt und als Isofarbflächengrafik abgebildet (Bild 97). Die Wellenhöhen sind von 0,00 m bis 2,00 m farbkodiert mit einer Klassenbreite von 0,20 m aufgetragen. Die schwarzen Pfeile geben für die lokal ermittelte maximale Wellenhöhe die Richtung an, die sie bei dem entsprechenden Ereignis hatte. Die ausbaubedingte Änderung der maximalen signifikanten Wellenhöhe wird als Differenz zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Sollzustand (AZ1 – PS2) ermittelt und als Isofarbflächengrafik nach dem bekannten Schema dargestellt (Bild 98). Die Differenzen werden von -0,11 m (Abnahme) bis 0,11 m (Zunahme) mit einer Klassenbreite von 0,02 m gekennzeichnet. Dabei sind die Abnahmen in Blautönen und die Zunahmen in Rottönen zu erkennen. Die schwarzen Pfeile geben die Richtungsänderung der Höchstwerte der signifikanten Wellenhöhen an.

Bei den Absolutwerten der maximalen signifikanten Wellenhöhe für den planerischen Sollzustand (Bild 97) können für den dargestellten Bereich zwei Wellensysteme identifiziert werden, die sich im Untersuchungszeitraum zu unterschiedlichen Zeiträumen bedingt durch die zu dieser Zeit vorherrschenden Windrichtung entwickelt haben. Im nördlichen Teil breiten sich die Wellen in West-Ost-Richtung aus und im südlichen Teil in Nord-Süd-Richtung. In der Abbildung der ausbaubedingten Änderungen der maximalen signifikanten Wellenhöhe (Bild 98) sind besonders im Nahfeld der Strombaumassnahme sowie der Wendestelle Differenzen zu erkennen. Bei der Wendestelle sind leichte Abnahmen der Wellenhöhen bis zu 0,03 m zu sehen. Diese Abnahmen werden auf die durch den Ausbau veränderten Wassertiefen in Kombination mit den dadurch veränderten Strömungsgeschwindigkeiten zurückgeführt. Dazu werden hier zum besseren Verständnis die ausbaubedingten Änderungen der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit (Bild 99) noch einmal gezeigt. Deutliche Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit stellen sich auch im Nahfeld der Strombaumassnahme ein. Hier führt die ausbaubedingte Zunahme der Ebbstromgeschwindigkeit zu einer Zunahme der maximalen signifikanten Wellenhöhen bis zu 0,05 m. Diese Zunahme entsteht in der Ebbphase als Folge von Refraktion und Shoaling durch Wechselwirkung des aus Westen kommenden Seegangs mit der entgegenkommenden Strömung.

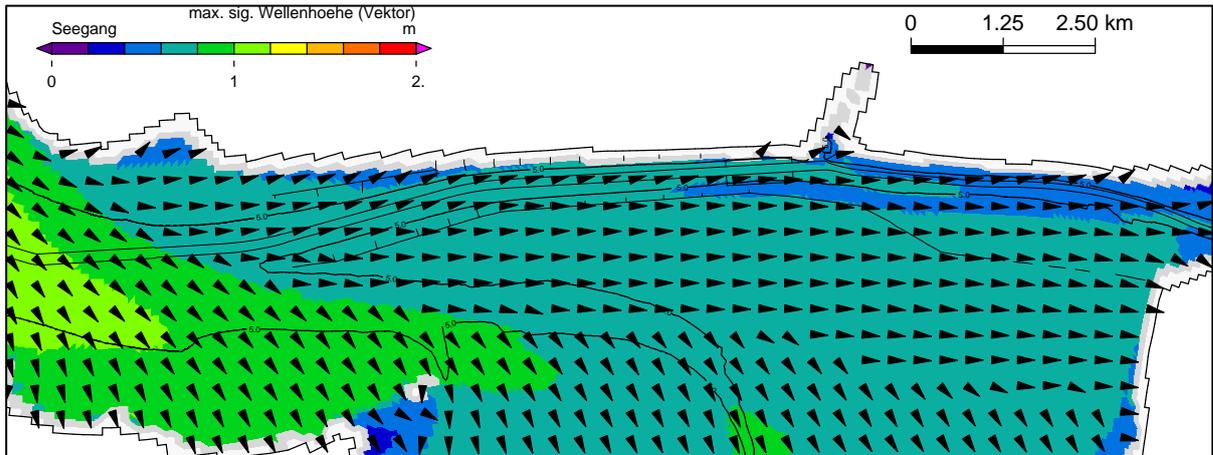


Bild 97: Maximale signifikante Wellenhöhe für den planerischen Sollzustand PS2 im Untersuchungszeitraum vom 2.10.2009 bis 22.10.2009.

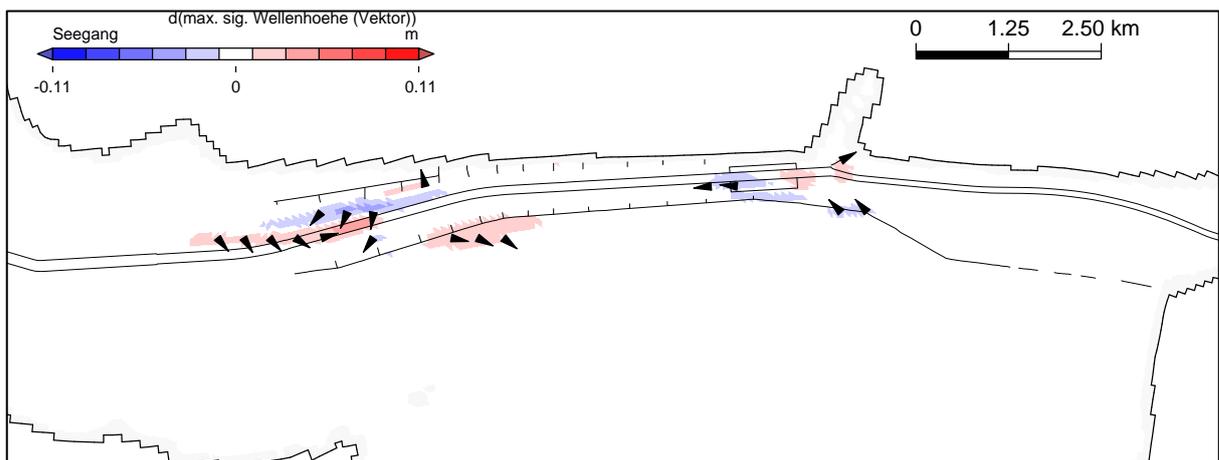


Bild 98: Differenz der maximalen signifikanten Wellenhöhe zwischen dem Ausbauzustand und planerischen Sollzustand PS2 im Untersuchungszeitraum vom 2.10.2009 bis 22.10.2009.

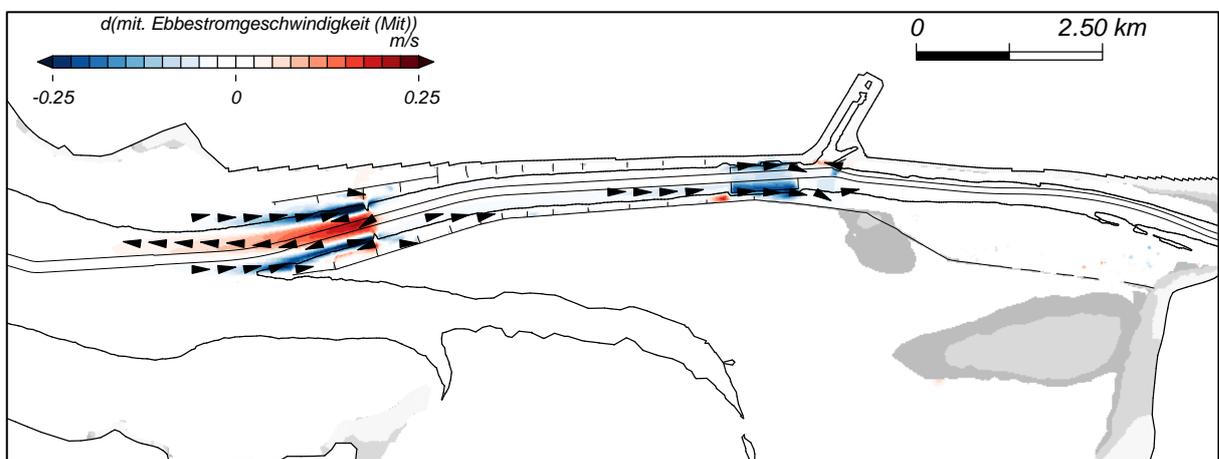
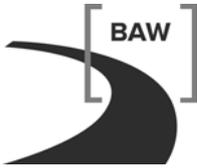
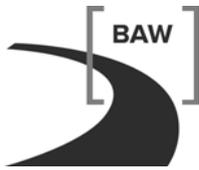


Bild 99: Differenz der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 7.3)



Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es durch den geplanten Ausbau der Außenems, bedingt durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Seegang, Topographie und Strömung örtlich differenziert sowie ereignisabhängig, in der Tendenz sowohl zu Zu- als auch zu Abnahmen der Wellenhöhen kommen wird. Die maximalen ausbaubedingten Änderungen der Wellenhöhe liegen dem Betrage nach unter 0,10 m. Dasselbe gilt für die Wellenperioden T_{m02} . Hier werden Änderungen dem Betrag nach bis zu 1 s erwartet.



Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Hamburg, im September 2012

Im Auftrag

gez. Winkel

Dr. rer. nat. N. Winkel
(Regierungsdirektor)

gez. Weilbeer

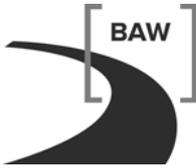
Dr.-Ing. H. Weilbeer
(Oberbaurat)

gez. Jürges

Dipl.-Ing. (FH) J. Jürges
(Tech. Angestellter)

gez. Uliczka

Dipl.-Ing. (FH) I. Uliczka
(Tech. Angestellte)



13 Literaturverzeichnis

Aqua Vision BV (2011): *Suspended sediment measurements in the Ems*, June 2011. AV_DOC_110023_Ems_CONCEPT, im Auftrag der BAW.

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.

BAW (2005): *SediMorph Validierungsdokument* – Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.

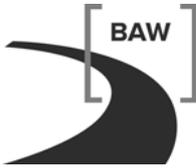
BAW (2007): *Anpassungsmaßnahmen an der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe* – Gutachten zur Untersuchung der Auswirkung einer bereichsweisen Anpassung der Unterems und des Dortmund-Ems-Kanals. Gutachten BAW A3955 03 10095, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, unveröffentlicht.

BAW (2010): *Aktionsprogramm des Bundes zur Reduzierung seines Unterhaltungsaufwandes und der Minimierung der Verschlickung der Unterems* – Bericht zur vertieften Wirkanalyse – Bericht BAW A3955 03 10143, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, unveröffentlicht.

BAW (2011): *Minimierung der Auswirkungen des geplanten Ausbaus der Zufahrt nach Emden mit einer Wendestelle bei Emden* – Bericht BAW A3955 03 10144, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, unveröffentlicht.

BAW (2012a): *Vertiefung der Außenems bis Emden* – Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen – Gutachten BAW A3955 03 10144, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, unveröffentlicht.

BAW (2012b): *Vertiefung der Außenems bis Emden* – Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen – Gutachten BAW A3955 02 10121, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg, unveröffentlicht.



BAW (2012c): *Modelluntersuchungen zum Sedimentmanagement in der Außenems - Bericht über den Stand der Arbeiten bei der BAW für die Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe „Baggergutunterbringung in der Außenems“* – Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.

Casulli, V. and R. A. Walters (2000): *An unstructured, three-dimensional model based on the shallow water equations*, Int. Journal for Numerical Methods in Fluids 2000, 32: 331 - 348.

IMS (2010). *Erfassung der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen - Bereitstellung von Seegangsparametern für die Bundesanstalt für Wasserbau*, IMS-Bericht 90141-01, IMS Ingenieurgesellschaft MBH 8. April 2010.

Krebs, M. & Weilbeer, H. (2008). *Ems-Dollart-Estuary*. Die Küste (74).

Lang, G. (2003): *Analyse von HN-Modellergebnissen im Tidegebiet* – BAW Mitteilungsblatt Nr. 86, Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe.

Maushake, C. (2009): *Ad-hoc Messprogramm zur Erfassung der Sedimentdynamik im Umfeld des Ems-Sperrwerkes*. BAW-Kolloquium „Aktuelle Untersuchungen an der Ems und Ergebnisse aus Forschungsarbeiten“, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg. http://vzb.baw.de/publikationen.php?file=kolloquien/0/ems_ssc_kolloq_Notizen.pdf

Maerker, C. & Malcherek, A. (2007): *DredgeSim – Erstellung der Grundversion eines Modulpakets zur morphodynamisch-numerischen Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen*. Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München.

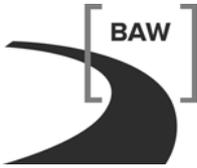
NLWKN (2008). *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Weser- und Emsgebiet – 2005*. Bericht, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küste- und Naturschutz.

NLWKN (2011). *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Weser- und Emsgebiet – 2007*. Bericht, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küste- und Naturschutz.

Rodi, W. (1987), *Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids*, J. Geophys. Res., 92(C5), 5305–5328.

RWS (2006). *Startnotiz zur Verbesserung des Fahrwassers Eemshaven - Nordsee*. Rijkswaterstaat Noord-Nederland, 11. Oktober 2006.

Schneggenburger, C.(1998). *Spectral Wave Modelling with Nonlinear Dissipation*. Technical Report GKSS 98/E42, Forschungszentrum-Geesthacht.



WSA Emden (2008). *Vertiefung der Außenems bis Emden - Unterlage zum Scoping-Termin nach §5 UVPG*. Wasser- und Schifffahrtsamt Emden, Oktober 2008, Projektgruppe Projektsteuerung Tideems.

WSA Emden (2012a). *Vertiefung der Außenems bis Emden - Projektbeschreibung für das Vorhaben*. Wasser- und Schifffahrtsamt Emden, Aktualisierung 2012.

WSA Emden (2012b). *Aktennotiz zur Überprüfung der Zustände PS1 und PS2*. Wasser- und Schifffahrtsamt Emden, 2. März 2012.

WSD Nord-West (2009). *Geplante Vertiefung der Außenems bis Emden – Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. §5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)*. Untersuchungsrahmen 17. April 2009, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord-West - Planfeststellungsbehörde.



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de