

Vertiefung der Außenems bis Emden

**Vergleich aktualisierter Modell-
prognosen mit dem Gutachten zu den
ausbaubedingten Änderungen von
Hydrodynamik, Transport und Seegang
aus dem Jahr 2012**

Auftragsnummer B3955.03.10.10208

Vertiefung der Außenems bis Emden

Vergleich aktualisierter Modellprognosen mit dem Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang aus dem Jahr 2012

Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee
Am Eisenbahndock 3, 26725 Emden

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

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.10.10208

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeitung: Dipl.-Ing. (FH) Jens Jürges
Anton Rosenhagen M. Sc.

Hamburg, im Dezember 2021

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

Zusammenfassung

Bedingt durch eine längere Verfahrensunterbrechung des Projektes "Vertiefung der Außenems bis Emden" ist zu prüfen, ob die Auswirkungsprognosen der Bundesanstalt für Wasserbau zur geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden aus dem Jahre 2012 auch unter Berücksichtigung der überarbeiteten Planung und weiterentwickelter Simulationsmethoden weiterhin als belastbare Grundlage für weiterführende und ebenso aktualisierte Auswirkungsprognosen der Umweltgutachter im laufenden Planfeststellungsverfahren verwendet werden können. Hierzu werden die Modellrechnungen und Tidekennwert-Analysen für den geplanten Ausbau-Zustand und einen aktuellen planerischen Ist-Zustand wiederholt und mit den älteren Ergebnissen verglichen. Zusätzlich wird im Bereich der Bühnenverlängerung ein Kolk als Folge der örtlich erhöhten Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz berücksichtigt. Es wird dabei keine Kolk-Entwicklung simuliert, sondern ein idealisierter Kolk mit gegebener Tiefe im Ausbau-Zustand vorgegeben.

Die Unterschiede in der Bearbeitung im Vergleich zum Gutachten 2012 ergeben sich im Wesentlichen aus drei Gründen: Erstens wurde der Ausbau-Zustand den aktualisierten Planungen gegenüber 2012 angepasst. Auch der Umgang mit Mindertiefen in der Fahrrinne sowie die Form und Solltiefe der Wendestelle wurde zwischenzeitlich vom Träger des Vorhabens verändert, so dass sich das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes insgesamt von ursprünglich 1,8 Mio m³ auf nun 2,7 Mio m³ erhöht. Zweitens ist die verwendete Simulationsmethode dem neuesten Stand von Technik und Wissenschaft angepasst worden. Die sogenannte SubGrid-Technologie ermöglicht nun eine präzisere Abbildung der Höhenlage des zu verlängernden Bühnenpaares. Drittens sind Rand- und Anfangswerte zusammen mit der Topographie auf den neuesten Stand gebracht worden (z. B. Umstellung auf das digitale Geländemodell 2015 statt zuvor 2010).

Diese veränderten Randbedingungen führen dazu, dass sich die Berechnungsergebnisse der aktuellen Modellrechnungen im Vergleich zu den ausbaubedingten Änderungen von 2012 verändert haben. Es zeigt sich dennoch, dass die gutachterlichen Aussagen aus 2012, basierend auf der Interpretation und Bewertung der Simulationsergebnisse, weiterhin auf der sicheren Seite liegen, so dass sie auch unter Berücksichtigung der überarbeiteten Planungsgrundlagen weiterhin gültig und belastbar sind, mit folgenden Ausnahmen:

- Die geplante Wendestelle kurz vor Emden führt zu einer dem Betrag nach größeren maximalen Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten von 0,15 m/s auf nun 0,2 m/s.
- Die ausbaubedingte Verlagerung der Brackwasserzone seewärts von Knock um weniger als 100 m kann sowohl nach Unterstrom als auch nach Oberstrom erfolgen.
- Die Zunahmen der Baggermengen im Rahmen der Unterhaltung der Fahrrinntiefen müssen von 10 % auf nun 15 % angehoben werden.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	1
3	Unterschiede im Vergleich zur Bearbeitung für das Gutachten 2012	2
3.1	Berücksichtigung der überarbeiteten Planung zum Ausbau-Zustand	2
3.2	Erweiterungen in der Modelltechnik	5
3.3	Aktualisierung der Gewässertiefen	7
3.4	Aktualisierung des Simulations- und Analysezeitraums	9
3.5	Hinweise zum gewählten Szenario	10
3.6	Vergleich der numerischen Parameter	10
4	Abschätzung einer Kolk-Entwicklung nach Verlängerung des Bühnenpaares 6/7	12
5	Vergleich der Analyse-Ergebnisse zu den ausbaubedingten Änderungen	17
5.1	Erläuterungen zu den Tidekennwert-Analysen und den Darstellungen	17
5.2	Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Wasserstand	20
5.3	Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Strömungsgeschwindigkeit	23
5.4	Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Salzverteilung	35
5.5	Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Schwebstoff-Haushalt	44
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	53
7	Literaturverzeichnis	57

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Mittlere Tiefenänderung zur Herstellung des Ausbau-Zustands	3
Bild 2: Draufsicht mit Lage und Solltiefen der geplanten Wendestelle	4
Bild 3: Längsprofile der Gewässertiefe zwischen Ems-km 39 und 42	5
Bild 4: Prinzip-Darstellung zum Modellverfahren UnTRIM	6
Bild 5: Auflösung des Buhnenpaares im Berechnungsgitter	7
Bild 6: Längsprofile der mittleren Gewässertiefen für das DGMW 2010 und DGMW 2015	8
Bild 7: Lage des idealisierten Kolkes zwischen den zu verlängernden Buhnen	13
Bild 8: Mittlere Bodenschubspannung im Bereich des Emders Fahrwassers	15
Bild 9: Gebietsgemittelte mittlere Bodenschubspannung für den idealisierten Kolk	16
Bild 10: Analytierte Querprofile für das Modell 2012 und für das aktuelle Modell	19
Bild 11: Tidehochwasser im Längsschnitt	21
Bild 12: Tideniedrigwasser im Längsschnitt	22
Bild 13: Tidehub im Längsschnitt	23
Bild 14: Tiefengemittelte maximale Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt	26
Bild 15: Tiefengemittelte maximale Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt	27
Bild 16: Tiefengemittelte mittlere Flutstromgeschwindigkeit im Längsschnitt	28
Bild 17: Tiefengemittelte mittlere Ebbestromgeschwindigkeit im Längsschnitt	29
Bild 18: Draufsicht der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Ems-km 67 und 70	31
Bild 19: Tiefengemittelter minimaler Salzgehalt im Längsschnitt	38
Bild 20: Tiefengemittelter maximaler Salzgehalt im Längsschnitt	39
Bild 21: Tiefengemittelter mittlerer Salzgehalt im Längsschnitt	40
Bild 22: Prinzipskizze zur horizontalen Verlagerung der Brackwasserzone	41
Bild 23: Längsschnitt der ausbaubedingten hor. Verlagerung der Brackwasserzone	43
Bild 24: Tiefengemittelter maximaler Schwebstoffgehalt im Längsschnitt	46
Bild 25: Tiefengemittelter mittlerer Schwebstoffgehalt im Längsschnitt	47
Bild 26: Advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom im Längsschnitt	49
Bild 27: Advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom im Längsschnitt	50
Bild 28: Advektiver Netto-Schwebstofftransport im Längsschnitt	51

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Vergleich der mittleren Tiefen auf Basis des DGMW 2010 und des DGMW 2015	9
Tabelle 2: Parameter des aktuellen Modells im Vergleich mit dem Gutachten-Modell	11
Tabelle 3: Tidal Duration Asymmetry (TDA): Ebbedauer zu Flutdauer	33
Tabelle 4: Flow Velocity Asymmetry (FVA): max. Flutstrom- zu Ebbestromgeschw.	34
Tabelle 5: Flow Duration Asymmetry (FDA): Stauwasser dauern Flut- zu Ebbestrom	35
Tabelle 6: Lage der Brackwasserzone für die Isohalinen 3 ‰, 18 ‰ und 30 ‰	43

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Bedingt durch eine längere Verfahrensunterbrechung des Projektes "Vertiefung der Außenems bis Emden" ist zu prüfen, ob die Auswirkungenprognosen der Bundesanstalt für Wasserbau zur geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden aus dem Jahre 2012 auch unter Berücksichtigung der überarbeiteten Planung und weiterentwickelter Simulationsmethoden weiterhin als belastbare Grundlage für weiterführende und ebenso aktualisierte Auswirkungenprognosen der Umweltgutachter im laufenden Planfeststellungsverfahren verwendet werden können.

Folgende Arbeitsschritte sind hierfür erforderlich:

- Herstellung der Modelltopografie des aktuellen Ausbau-Zustandes (AZ) und des planerischen Vergleichs-(Ist)-Zustands (PIZ). Hierbei gilt es, die nach 2012 überarbeitete Planung zu berücksichtigen.
- Auswahl eines im Gutachten der BAW zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW 2012) verwendeten Szenarios mit dem Ziel, die aktuellen Ergebnisse mit den Ergebnissen dieses Szenarios zu vergleichen.
- Durchführung der Modellrechnungen und Tidekennwertanalysen für den Ausbau- und den Vergleichszustand mit dem aktuellen Ems-Modell der BAW, basierend auf dem digitalen Geländemodell des Wasserlaufs (DGMW) 2015 (ARGE 2016). Die Validität des aktuellen Ems-Modells ist in einem gesonderten Bericht dokumentiert (BAW 2021).
- Abschätzung der maximalen Kolkentwicklung zwischen dem zu verlängernden Bühnenpaar 6/7 auf Basis der Zunahme der Bodenschubspannungen durch die Querschnittseingengung. Für alle anschließenden Vergleiche mit älteren Analysen soll auch die Modellvariante mit Kolk verwendet werden.

Ziel ist es, dass die BAW ein aktuelles Ems-Modell verwendet, um die Modellrechnungen und Tidekennwert-Analysen für den geplanten Ausbau-Zustand und einen aktuellen planerischen Ist-Zustand für ein Szenario des Gutachtens der BAW zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW 2012) zu wiederholen und mit den älteren Ergebnissen zu vergleichen.

2 Unterlagen und Daten

Unterlagen und Daten aus dem Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW 2012) werden wiederverwendet und durch aktuelle Unterlagen ergänzt.

Aktuelle Informationen zum geplanten Ausbau-Zustand sind der BAW vom Auftraggeber per Email zur Verfügung gestellt worden. Dies sind die neue Lage und Solltiefe der Wendestelle und die geplante Änderung zum Eingriffshorizont zur Berücksichtigung von Mindertiefen.

Das für die Fragestellung verwendete numerische Modell der Ems wird in einem Validierungsdokument beschrieben (BAW 2021).

3 Unterschiede im Vergleich zur Bearbeitung für das Gutachten 2012

Die Unterschiede in der Bearbeitung im Vergleich zum Gutachten 2012 lassen sich grob in drei Teile untergliedern: Erstens wurde der geplante Ausbau-Zustand gegenüber 2012 angepasst (siehe Kapitel 3.1). Zweitens wurde die Modelltechnik erweitert (siehe Kapitel 3.2 und in der vergleichenden Zusammenstellung der numerischen Parameter in Kapitel 3.6) und drittens sind Aktualisierungen bezüglich der Rand- und Anfangswerte vorgenommen worden (siehe Kapitel 3.3 bezüglich der Gewässertiefen und Kapitel 3.4 bezüglich des Simulations- und Analysezeitraums).

3.1 Berücksichtigung der überarbeiteten Planung zum Ausbau-Zustand

Im Rahmen der aktuellen Untersuchungen gibt es drei Veränderungen im Ausbau-Zustand im Vergleich zu den Planungen von 2012:

1. Der Umgang mit Mindertiefen in der Fahrrinne: Derzeit werden von Seiten des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Ems-Nordsee Mindertiefen in der Fahrrinne weitestgehend unterbunden, weil es hierfür einen Eingriffshorizont definiert hat: Das WSA lässt die Bagger bis zu einem halben Meter tiefer als Solltiefe baggern, um sicherstellen zu können, dass für einen gewissen Zeitraum nach den Baggerarbeiten keine Mindertiefen auftreten. Diese Praxis soll zukünftig seewärts Ems-km 53 nicht mehr praktiziert werden. Dieser Aspekt wird hier wie folgt berücksichtigt: Die aktuelle Solltiefe wird für den Bereich der Ausbaustrecke (Ems-km 40,7 bis 74,6) um 0,5 m für den Eingriffshorizont zusätzlich vertieft. Im planerischen Ist-Zustand wird die Fahrrinne auf diesen resultierenden Tiefenhorizont bestehend aus Solltiefe und Eingriffshorizont vertieft, sofern dieser Zustand vorher flacher war. Übertiefen bleiben erhalten. Im Ausbau-Zustand wird die Fahrrinne weiter vertieft, zwischen Ems-km 40,7 und 53,0 auf die neue Solltiefe und 0,5 m für den Eingriffshorizont und seewärts Ems-km 53 bis 74,6 auf die neue Solltiefe.

Das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes beträgt insgesamt 2,7 Mio m³ (Basis ist das DGMW 2015) und setzt sich zusammen aus dem Baggervolumen zur Herstellung der Solltiefen in der Fahrrinne und der Wendestelle (2,0 Mio m³) und dem Baggervolumen zur Berücksichtigung des Eingriffshorizonts (0,7 Mio m³). Im Gutachten 2012 wurde kein Eingriffshorizont berücksichtigt. Das Baggervolumen zur Herstellung der Solltiefen in der Fahrrinne und der Wendestelle betrug damals 1,8 Mio m³ (Basis war das DGMW 2010).

Bild 1 zeigt kilometergenau, wo die Hauptbaggerschwerpunkte zur Herstellung des Ausbau-Zustandes sind und welchen Einfluss die Berücksichtigung des Eingriffshorizonts auf die Tiefenänderung und damit das Baggervolumen hat. In der Hauptbaggerstrecke zwischen Ems-km 41 und 53 führt die Berücksichtigung des Eingriffshorizonts zu einer Zunahme der Tiefenänderung von im Mittel 44 cm ohne Eingriffshorizont auf 80 cm mit Eingriffshorizont. Daraus folgt, dass nur mit Berücksichtigung des Eingriffshorizonts die tatsächliche Zunahme der Tiefen vom planerischen Ist-Zustand zum Ausbau-Zustand

näherungsweise der Solltiefezunahme entspricht.

Seewärts der Hauptbaggerstrecke gibt es einzelne Bereiche mit Baggeraktivität. Das Baggervolumen dieses Abschnitts beträgt 0,27 Mio m³, etwa 10 % des Gesamtbagervolumens und 0,13 Mio m³ mehr im Vergleich zum Gutachten 2012.

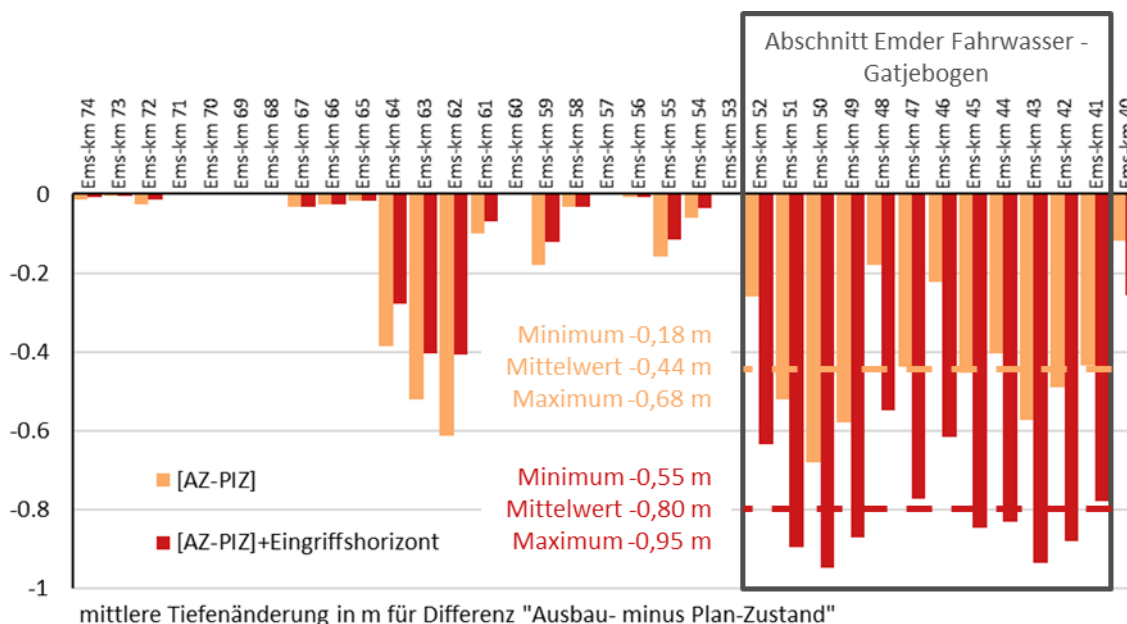


Bild 1: Darstellung der mittleren Tiefenänderung zur Herstellung des Ausbau-Zustands bezogen auf einen planerischen Ist-Zustand getrennt für jeden Kilometer-Abschnitt der Fahrrinne zwischen Ems-km 40 und 74. In Rot für den aktuellen Ausbau- und planerischen Ist-Zustand unter Berücksichtigung des Eingriffshorizonts (im planerischen Ist-Zustand auf ganzer Ausbaustrecke, im Ausbau-Zustand nur zwischen Ems-km 40,7 und 53,0). Dazu vergleichend in Orange ohne Eingriffshorizont. Die Hauptbaggerstrecke zwischen Ems-km 41 und 53 ist hervorgehoben. Für diese Strecke bestehend aus 12 Ein-Kilometer-Abschnitten sind Minimum, Mittelwert und Maximum mit und ohne Eingriffshorizont in Textform dargestellt.

- Die Form und die Solltiefe der Wendestelle: Die veränderte Form zeigt Bild 2. Die Solltiefen nehmen im einstelligen cm-Bereich zu. Trotzdem nimmt das Baggervolumen zur Herstellung der Wendestelle ohne Berücksichtigung des Eingriffshorizonts auf Basis des DGMW 2015 im Vergleich zum Gutachten-Modell um 24 Tausend m³ ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wendestellen-Fläche im DGMW 2015 im Mittel 11 cm tiefer liegt, als im DGMW 2010. Diese Zunahme der mittleren Tiefe ist größer als die Zunahme der Solltiefen. Dazu trägt auch die neue Trapez-Form bei, die im Südosten einen Teil des Böschungsbereichs ausspart und dafür tiefere Flächen im Südwesten enthält. Der Eingriffshorizont wird für die Wendestelle wie folgt berücksichtigt: Im planerischen Ist-Zustand wird der mittlere Abschnitt (also nur die Fahrrinne) auf die aktuelle Solltiefe plus 0,5 m vertieft. Im Ausbau-Zustand wird die gesamte Fläche der Wendestelle auf die neue Solltiefe plus 0,5 m vertieft. Im planerischen Ist-Zustand wird die Wendestellen-Fläche dadurch im Mittel 4 cm tiefer, im Ausbau-Zustand 48 cm tiefer. Das Baggervolumen zur Herstellung der Wendestelle unter Berücksichtigung des

Eingriffshorizonts ist 136 Tausend m³ größer als ohne Berücksichtigung des Eingriffshorizonts. Entsprechend ist das Baggervolumen zur Herstellung der Wendestelle auf Basis des DGMW 2015 um 112 Tausend m³ größer als im Gutachten-Modell von 2012.

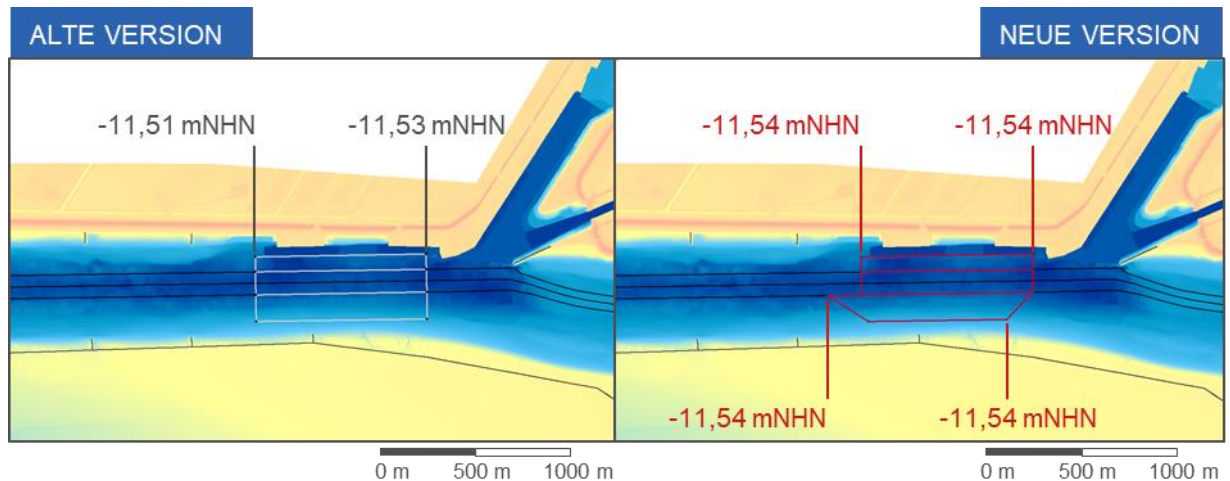


Bild 2: Draufsicht mit der Lage und den Solltiefen der geplanten Wendestelle zwischen Ems-km 41,2 und 42,1. Links die Darstellung der ursprünglichen Planung mit einer rechteckigen Form und Solltiefen, die wie in der Fahrrinne geringfügig geneigt sind. Rechts die Darstellung der aktuellen Planung mit einer trapezförmigen südlichen Grenze und einer konstanten Solltiefe von -11,54 mNHN.

3. Anschluss der Fahrrinne an die Unterems bei Ems-km 40,7: Am östlichen Ende der Ausbaustrecke bei Ems-km 40,7 geht die Fahrrinne in die Unterems über. Bild 3 zeigt im mittleren Diagramm die Gewässertiefen im Längsprofil sowohl für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) als auch für den Ausbau-Zustand (AZ), jeweils für das Gutachten-Modell auf Basis des DGMW 2010 als auch für das aktuelle Modell auf Basis des DGMW 2015. Zu erkennen ist hier ein Sohlsprung von den Tiefen des Emders Fahrwassers auf die Tiefen der Unterems. Dieser Sohlsprung beträgt etwa 3 Höhenmeter (ca. -11 mNHN auf -8 mNHN) auf einer Strecke von ungefähr 200 m in Längsrichtung. Im unteren Diagramm sind die Tiefenunterschiede zwischen PIZ und AZ abgebildet. Der Vergleich der Tiefenunterschiede zeigt, dass die maximalen Tiefenänderungen im aktuellen Modell nicht größer als 1 m sind, wohingegen die maximalen Tiefenänderungen im Gutachten-Modell im Bereich des Sohlsprungs knapp 3 m betragen. Entsprechend ist im aktuellen Modell das Baggervolumen zur Herstellung des AZ geringer als im Gutachten-Modell von 2012. Ursachen hierfür sind, dass im PIZ des Gutachten-Modells der Sohlsprung etwa 40 m weiter westlich beginnt als im PIZ des aktuellen Modells und dass im Gutachten-Modell der Ausbau der Fahrrinne etwa 100 m in den Sohlsprung hineingebaggert wurde.

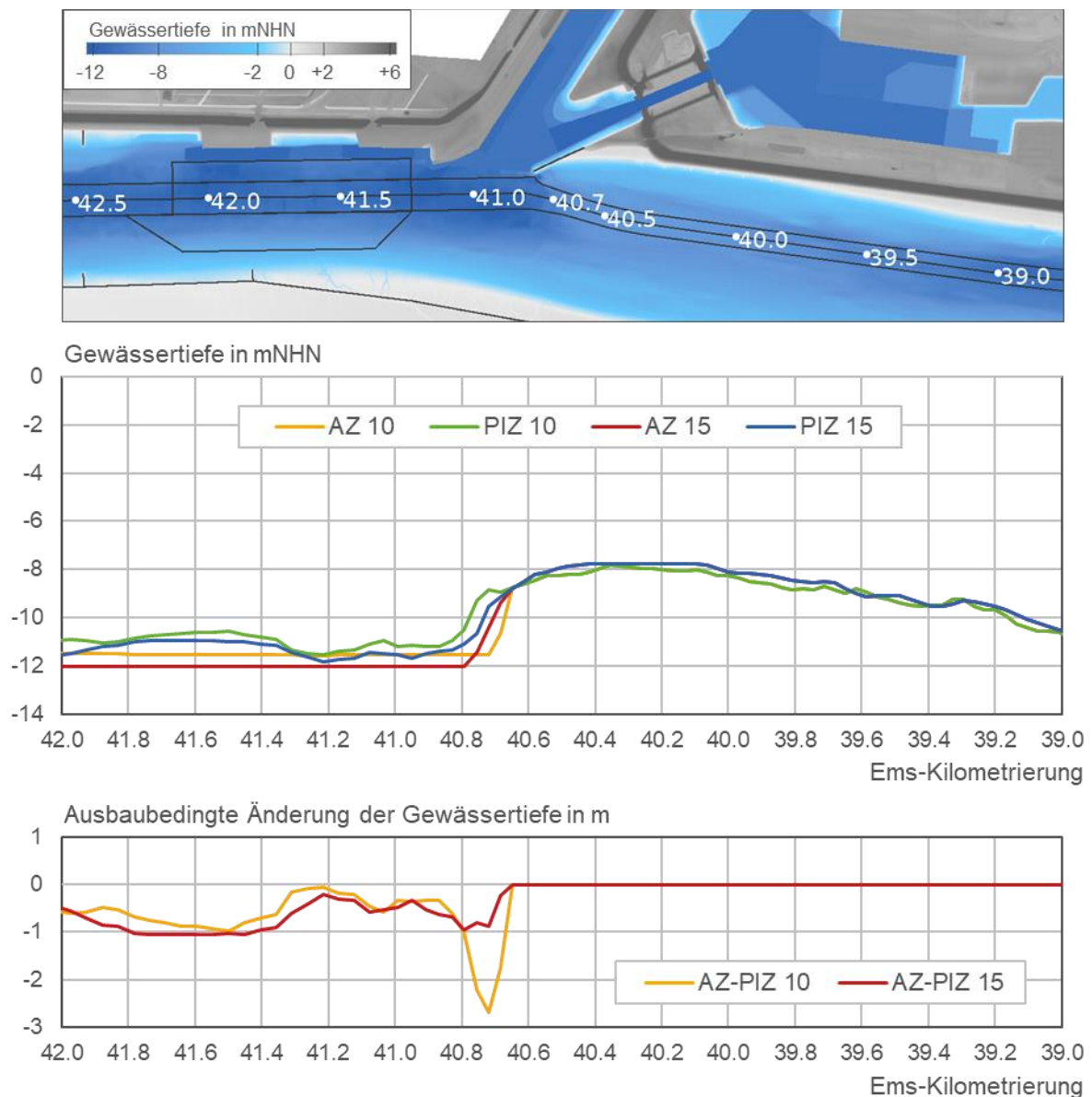


Bild 3: *Längsprofile der Gewässertiefe (Mitte) in der Fahrrinne und der ausbaubedingten Änderungen (Unten) zwischen Ems-km 39 und 42 für die planerischen Ist- und Ausbau-Zustände des Gutachten-Modells auf Basis des DGMW 2010 (Grün für den PIZ und Orange für den AZ) und des aktuellen Modells auf Basis des DGMW 2015 (Blau für den PIZ und Rot für den AZ).
 Oben eine Übersichtsdarstellung als Draufsicht mit der Lage der Ems-Kilometrierung und der Einfahrt zum Hafen Emden mit der Großen Seeschleuse. Die Farben geben die Gewässertiefe im DGMW 2015 wieder.*

3.2 Erweiterungen in der Modelltechnik

Die aktuellen Modellläufe sind mit dem Modellverfahren UnTRIM (Casulli 2009) durchgeführt worden. Die wesentliche Erweiterung des Modellverfahrens ist die Möglichkeit, hochaufgelöste Informationen zur Bathymetrie im Berechnungsgitter abzuspeichern. Hochaufgelöst meint, dass die Kanten und Elemente des Berechnungsgitters nicht nur eine mittlere Wassertiefe besitzen,

sondern dass für jede Kante und jedes Element eine im Prinzip beliebig detaillierte Tiefenverteilung vorgegeben werden kann. Das hat Auswirkungen auf das Trockenfallen und Überfluten innerhalb des Modellverfahrens, denn eine Kante oder ein Element des Berechnungsgitters kann nun nicht mehr nur „komplett trocken“ oder „komplett überflutet“ sein, sondern jede Kante und jedes Element kann auch „teilweise überflutet“ sein. Damit können die Durchflussflächen der Kanten und das Wasservolumen der Elemente sehr viel genauer berücksichtigt werden. Casulli nennt diese Technik „SubGrid“. Bild 4 beschreibt das Prinzip.

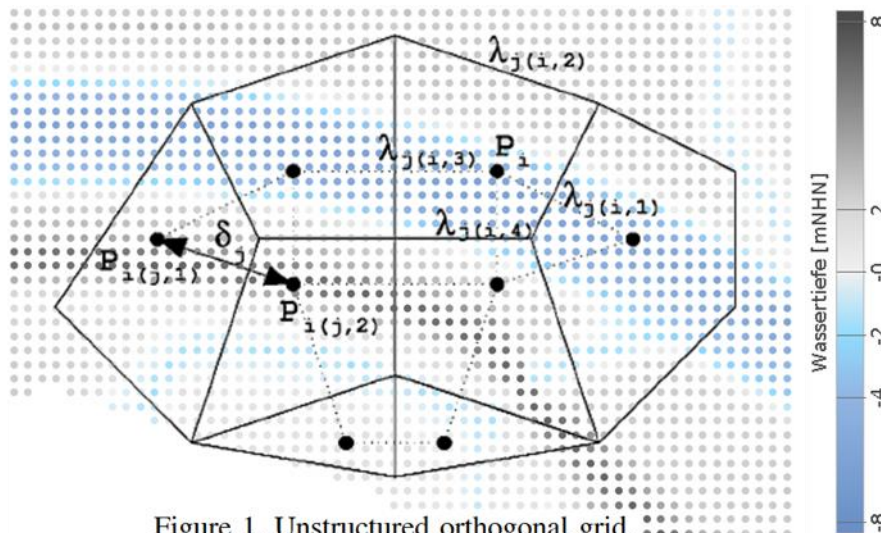


Figure 1. Unstructured orthogonal grid.

nach: Casulli, Vincenzo (2009): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface Hydrodynamics. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 60:391-408. DOI: 10.1002/flid.1896.

Bild 4: *Prinzip-Darstellung zum Modellverfahren UnTRIM. Dargestellt sind das Berechnungsgitter (schwarze Linien und Bezeichnungen) und die im Vergleich zum Berechnungsgitter hochaufgelösten Informationen zur Tiefenverteilung als Punkt-Raster. Die Darstellung des Berechnungsgitters entspricht Figure 1 aus Casulli (2009). Das zusätzlich zur Original-Grafik eingeblendete Punkt-Raster ist unterschiedlich eingefärbt, je nach Tiefe des Rasterpunktes. Mit UnTRIM besteht nun die Möglichkeit, z.B. die Tiefenwerte aller Rasterpunkte, die innerhalb eines Elementes liegen, für die Berechnung der Tiefenverteilung jedes einzelnen Elementes heranzuziehen. Bei einem Wasserstand von z.B. 0 m wäre dann der blaue Bereich der Elemente überflutet und der graue Bereich trocken gefallen.*

Im aktuellen Modell wurde die Möglichkeit, hochaufgelöste Informationen zur Bathymetrie im Berechnungsgitter abzuspeichern, u.a. dazu genutzt, die Verlängerung des Buhnenpaares 6/7 bezüglich der die Strömung einengenden Querschnittsfläche präziser abzubilden. Bild 5 zeigt die Wirkung der höher aufgelösten Tiefen auf die Querschnittsfläche im aktuellen Modell.

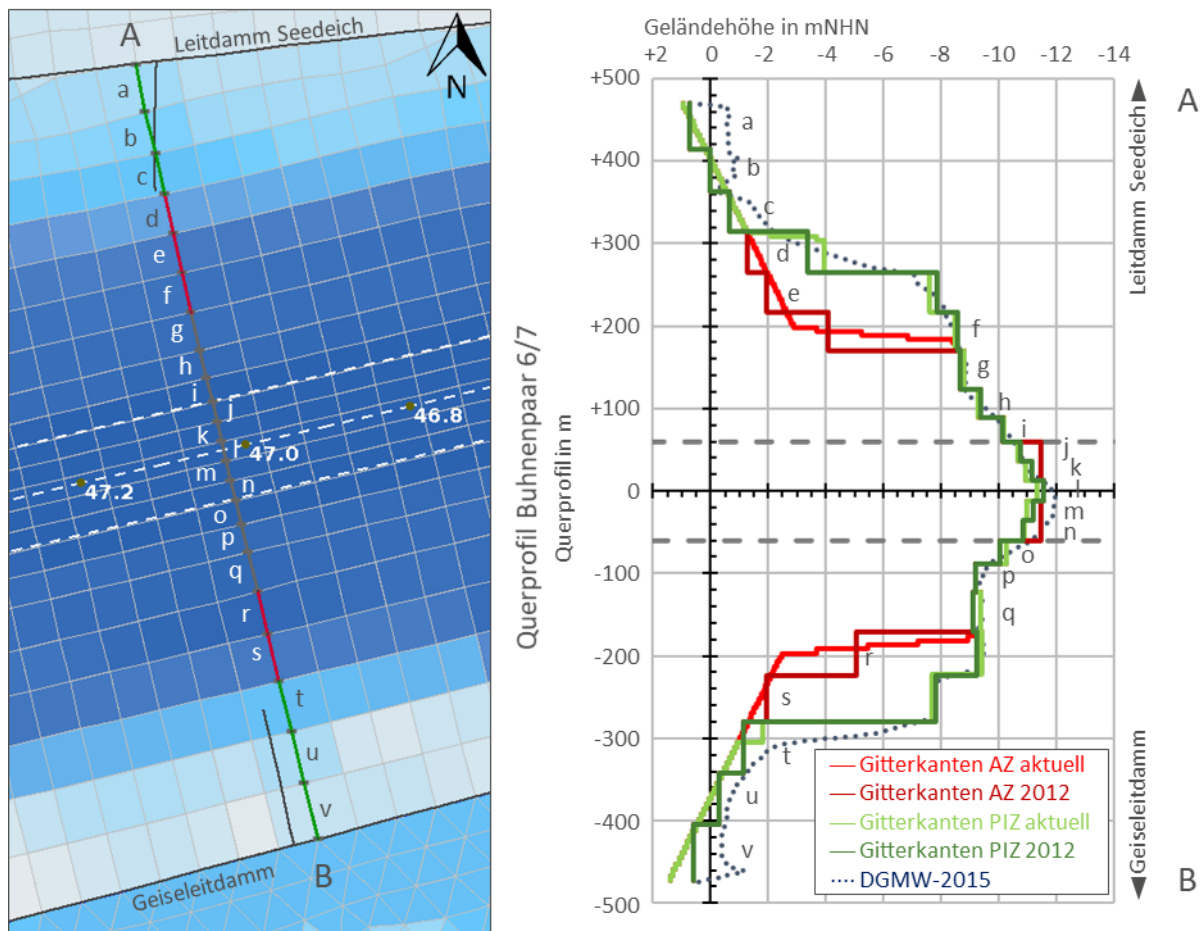


Bild 5: Auflösung des Buhnenpaares im Berechnungsgitter: Links als Draufsicht im Emdener Fahrwasser zwischen Ems-km 46,8 und 47,2. Rechts als Querprofil zwischen Leitdamm Seedeich im Norden und dem Geiseleitdamm im Süden. Die Gitterkanten des Querprofils Buhnenpaar 6/7 sind in beiden Ansichten von a bis v durchnummeriert. Die Kanten a bis c und t bis v repräsentieren die Buhnen 6 und 7 im planerischen Ist-Zustand. Durch die Verlängerung dieser Buhnen werden die Tiefen der Gitterkanten d bis f sowie r und s im Ausbau-Zustand im Vergleich zum planerischen Ist-Zustand angehoben. Die Querprofil-Darstellung zeigt, dass die Tiefen im Gutachten-Modell 2012 stufig abgebildet werden, denn für jede Gitterkante konnte nur genau eine konstante Tiefe angegeben werden. Im aktuellen Modell sind die Gitterkanten, die die Buhnen 6 und 7 repräsentieren (a bis f und r bis v), in jeweils 10 kurze Abschnitte unterteilt, die jeweils eigene Tiefen besitzen. So kann die die Strömung einengende Querschnittsfläche deutlich planähnlicher approximiert werden. Man vergleiche hierzu das hellrote (Ausbau-Zustand aktuell) und dunkelrote Querprofil (Ausbau-Zustand Gutachten 2012). Hinweis: Die unterschiedlichen Tiefen im planerischen Ist-Zustand zwischen dem Gutachten-Modell 2012 (dunkelgrün) und dem aktuellen Modell (hellgrün) sind auf die unterschiedlichen digitalen Geländemodelle zurückzuführen, die den planerischen Zuständen zu Grunde liegen: Für das Gutachten-Modell 2012 war das DGMW 2010 die Grundlage, für das aktuelle Modell das DGMW 2015 (siehe auch Kapitel 3.3).

3.3 Aktualisierung der Gewässertiefen

Die Basis für die Tiefen des für das Gutachten 2012 verwendeten Ems-Modells war das DGMW 2010. Mit Hilfe von schiffsgestützten Peilungen für die tiefen Bereiche und Laser-Scan-

Messungen aus der Luft für die Wattflächen wurde ein hochaufgelöstes 1-m-Modell der Tiefenverteilungen für die Außenems, den Dollart und die Unterems erzeugt, d.h. für jeden Quadratmeter des Ems-Ästuars liegt genau eine Tiefeninformation vor.

Im Jahr 2015 wurde die Aktion wiederholt und zum bisher letzten Mal ein digitales Geländemodell für das Ems-Ästuar erzeugt. Aktuell laufen die Arbeiten zur Erzeugung eines neuen digitalen Geländemodells, diese Arbeiten sind aber noch nicht abgeschlossen. Entsprechend basiert das aktuelle Ems-Modell auf dem DGMW 2015.

Vergleich der Gewässertiefen in der Fahrrinne:

Bild 6 zeigt den Vergleich der Gewässertiefen zwischen den digitalen Geländemodellen 2010 und 2015 in der Fahrrinne der Ems von Borkum bis Herbrum. Zusätzlich ist für eine Bestimmung der mittleren Tiefenänderung die Fahrrinne in sechs Abschnitte unterteilt:

- Außenems von Borkum bis Ems-km 53 20 cm flacher als 2010
- Hauptbaggerstrecke (Ems-km 53 bis Emden) 8 cm tiefer als 2010
- Unterems von Emden bis Emssperrwerk 28 cm flacher als 2010
- Emssperrwerk bis Ledamündung 16 cm flacher als 2010
- Ledamündung bis Papenburg 8 cm flacher als 2010
- Dortmund-Ems-Kanal (DEK) bis Herbrum 7 cm tiefer als 2010

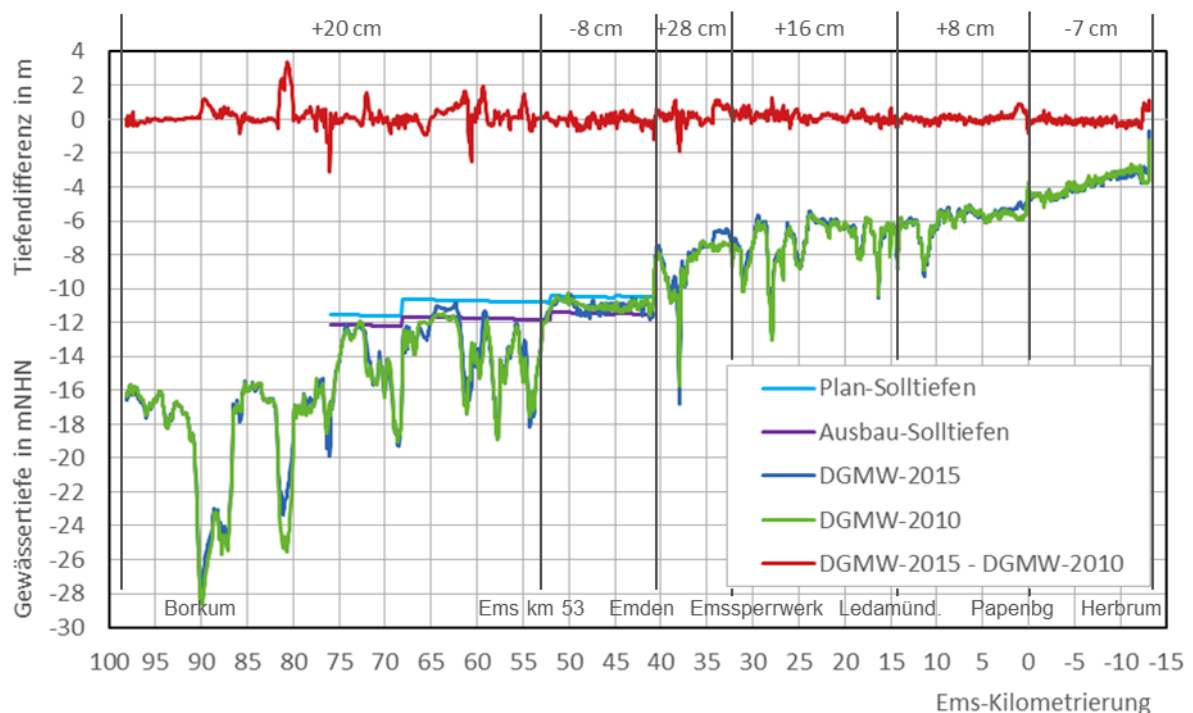


Bild 6: Längsprofile der mittleren Gewässertiefen in der Fahrrinne der Ems von Borkum bis Herbrum für das DGMW 2010 (grün) und das DGMW 2015 (blau). Zusätzlich sind die Solltiefen für den planerischen Ist-Zustand (hellblau) und für den Ausbau-Zustand (lila) und oben die Differenz zwischen beiden digitalen Geländemodellen (rot) dargestellt. Hier bedeuten positive Differenzen, dass es eine Auflandung von 2010 nach 2015 gegeben hat. Negative Differenzen bedeuten, dass eine Vertiefung von 2010 nach 2015 stattgefunden hat.

Vergleich der Gewässertiefen von Ufer zu Ufer:

Im planerischen Ist-Zustand ist die Fahrrinne im Gegensatz zum digitalen Geländemodell immer bis zur derzeit erlaubten maximalen Solltiefe ausgebaggert. Da sich die erlaubten Solltiefen zwischen 2012 und den aktuellen Untersuchungen nicht geändert haben, ist die Fahrrinne im planerischen Ist-Zustand seewärts der Ausbaustrecke und stromauf von Emden in beiden Untersuchungen gleich tief. Zwischen Fahrrinne und Ufer unterscheiden sich die planerischen Ist-Zustände jedoch durch die unterschiedlichen zugrunde liegenden digitalen Geländemodelle. Tabelle 1 listet die mittleren Tiefen in beiden planerischen Ist-Zuständen sowie die Unterschiede zwischen beiden Zuständen auf. Im PIZ auf Basis des DGMW 2015 ist die Außenems, das Emder Fahrwasser und der DEK im Mittel tiefer als auf Basis des DGMW 2010, wohingegen die Unterems im PIZ auf Basis des DGMW 2015 im Mittel flacher ist.

Tabelle 1: Abschnittsweiser Vergleich der mittleren Tiefen für die Flächen, die dauerhaft unter Wasser sind. Hierfür ist für alle Abschnitte ein Tiefengrenzwert von 2 m unter NHN als Näherungswert für das mTnw festgelegt worden. Der Vergleich erfolgt zwischen den planerischen Ist-Zuständen auf Basis des DGMW 2010 und des DGMW 2015. Zur Definition der Abschnitte siehe auch Bild 10 (rechte Hälfte) mit den Querprofilen im aktuellen Modell.

	PIZ auf Basis DGMW 2010: mittlere Tiefe in m NHN	PIZ auf Basis DGMW 2015: mittlere Tiefe in m NHN	Tiefenunterschied 2015 minus 2010
Außenems: Borkum – Dukegat (Ems-km 90 – 66)	10,17	10,40	23 cm tiefer
Außenems: Dukegat – Knock (Ems-km 66 – 48)	8,05	8,37	32 cm tiefer
Emder Fahrwasser: Knock – Emden (Ems-km 48 – 40)	8,32	8,42	10 cm tiefer
Unterems: Emden – Emssperrwerk (Ems-km 40 – 32)	6,00	5,91	9 cm flacher
Unterems: Emssperrwerk – Leda (Ems-km 32 – 15)	5,34	5,28	6 cm flacher
Unterems: Leda – Papenburg (Ems-km 15 – 0)	5,43	5,45	2 cm tiefer
DEK: Papenburg – Herbrum (Ems-km 0 – DEK-km 214)	3,91	4,13	22 cm tiefer

3.4 Aktualisierung des Simulations- und Analysezeitraums

Die Simulationen und Analysen für das Gutachten 2012 sind für den Zeitraum April und Mai 2010 durchgeführt worden. Die Simulation umfasst einen Zeitraum von zwei Spring-Nipp-Zyklen (ca. ein Monat). Die erste Hälfte des Zeitraums dient dem Einschwingen des Modells (insbesondere wichtig für Salzgehalt und Bodenzusammensetzung), die zweite Hälfte des Simulationszeitraums

wird auf Tidekennwerte analysiert. Für weitere Informationen hierzu siehe auch Kapitel 5.3.1 aus BAW (2012).

Der gewählte Analysezeitraum für das Gutachten 2012 vom 6. bis 21. Mai 2010 entspricht bezüglich des mittleren Tidehubs am Pegel Borkum-Südstrand mit 2,26 m exakt dem mittleren Tidehub des gesamten Jahres 2010¹. Damit konnte sichergestellt werden, dass der gewählte Analysezeitraum bezüglich der von der Nordsee in das Ems-Ästuar einlaufenden Tideenergie mittleren Verhältnissen entspricht.

Die aktuellen Simulationen und Analysen sind für einen gleich langen Zeitraum im Jahr 2015 durchgeführt worden. Das Jahr 2015 ist ausgewählt worden, weil die Tiefeninformationen ebenfalls 2015 gemessen worden sind (siehe auch Kapitel 3.3). Der Simulationszeitraum reicht vom 6. Juni bis zum 3. Juli 2015, der Analysezeitraum beginnt am 18. Juni 2015. Der Analysezeitraum ist so gewählt worden, dass der mittlere Tidehub der 28 Tiden dieses Spring-Nipp-Zyklus' wieder exakt 2,26 m am Pegel Borkum Südstrand entspricht. Die Vergleichbarkeit der Analysen ist also bezüglich der am Seerand eingesteuerten Tideenergie gegeben.

3.5 Hinweise zum gewählten Szenario

Im Gutachten von 2012 wurden insgesamt 3 unterschiedliche Szenarien definiert, simuliert und analysiert. Ziel war es, die Abhängigkeit der ausbaubedingten Änderungen vom Oberwasserzufluss aufzuzeigen. Die Szenarien unterschieden sich deshalb in erster Linie im gewählten Oberwasserzufluss und dazu jeweils passenden Salz- und Temperatur-Anfangszuständen. Szenario M2 entsprach dem mittleren Abfluss, Szenario M1 dem häufigsten Abfluss und Szenario S1 dem niedrigen Abfluss. Für mehr Details siehe Kapitel 6 und Tabelle 7 in BAW (2012).

Ziel dieses vorliegenden Gutachtens ist es zu zeigen, ob die gutachterlichen Aussagen der BAW aus 2012 unter aktuellen Randbedingungen und mit aktueller Modelltechnik weiterhin gültig sind. Hierzu ist es nicht notwendig, alle Szenarien zu wiederholen. Es ist ausreichend, die Ergebnisse eines Szenarios mit den Ergebnissen des gleichen Szenarios aus dem Gutachten 2012 zu vergleichen. Für diesen Vergleich ist das Szenario M1 mit dem häufigsten Abfluss gewählt worden, entsprechend 44 m³/s für die Ems am Wehr Herbrum und 11,4 m³/s für Leda und Jümme. Diese Werte sind unverändert übernommen worden, um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können.

Die Salzanfangsverteilung und die Randwerte des Salzgehalts am seeseitigen Rand des Modells und für alle Oberwasserzuflüsse ist nicht verändert worden.

3.6 Vergleich der numerischen Parameter

Tabelle 2 zeigt die Einstellungen der numerischen Parameter des aktuellen Modells und die Unterschiede im Vergleich zum Gutachten-Modell von 2012. Mit Verwendung der neueren UnTRIM-Version mit SubGrid (siehe Kapitel 3.2) wurde auch das Lösungsverfahren zur Berücksichtigung

¹ Siehe Pegelübersicht des WSA Emden für 2010: MThw₂₀₁₀ = 602 cmPNP und MTnw₂₀₁₀ = 376 cmPNP

der Advektion ausgetauscht. Das neue Verfahren ist dabei (näherungsweise) impulserhaltend und damit weniger numerisch diffusiv. Den Gezeiten steht mehr mechanische Energie für die Ausbreitung im Ästuar zur Verfügung, der Tidehub steigt an. Im Rahmen der Kalibrierung wird durch den Vergleich mit Messungen diese Modellantwort korrigiert: Die Energiedissipation wird durch Erhöhung entsprechender Parameter neu kalibriert:

- Der Koeffizient für die Bodenreibung in der Außenems hat sich von 5 mm auf 8 mm erhöht. Über das vertikale Turbulenzmodell führt die Erhöhung des Koeffizienten zu einer Zunahme des vertikalen Impulsaustausches. Die turbulente kinetische Energie in der Wassersäule nimmt zu und entsprechend reduziert sich die mechanische Energie, die den Gezeiten zur Verfügung steht.
- Der Koeffizient für den horizontalen Impulsaustausch hat sich von 0,05 m²/s auf 0,2 m²/s erhöht. Dies führt zu einem verstärkten Impulsaustausch zwischen den Regionen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten (typischerweise den Regionen mit größerer Wassertiefe) und den Regionen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (typischerweise den seitlichen ufernahen Flachwasserregionen). Auch hier reduziert sich in der Folge die mechanische Energie, die den Gezeiten zur Verfügung steht.

Tabelle 2: Parameter des aktuellen Modells im Vergleich mit dem Gutachten-Modell von 2012.

Parameter	Aktuelles Modell des Ems-Ästuars	Gutachten-Modell 2012
HN-Verfahren	UnTRIM 2009 mit SubGrid gekoppelt mit SediMorph	UnTRIM 2007 ohne SubGrid gekoppelt mit SediMorph
Dimension	3D; z-Schichten; vertikale Auflösung 1 m	
Zeitschritt	30 Sekunden	
Horizontaler Impulsaustausch	konstant 0,2 m ² /s	konstant 0,05 m ² /s
Vertikaler Impulsaustausch	k-ε-Turbulenzmodell (Rodi 1987)	
Bodenreibung	Nikuradse (zeitvariabel, abhängig vom mittl. Korndurchm.)	
Zusätzliche Reibungs-Koeffizienten	Außenems: 8 mm; Unterems: 0 mm	Außenems: 5 mm; Unterems: 0 mm
Salztransport	Ja	
Horiz. Stoffaustausch	konstant 0,1 m ² /s	
Vertikaler Stoffaustausch	k-ε-Turbulenzmodell	
Schwebstofftransport	Ja, eine Fraktion	
- Schluff	mittl. Korndurchmesser 20 µm; Sinkgeschwindigkeit nach Stokes; effektive Dichte 1650 kg/m ³ ; kritische Schubspannung nach Shields	
Horiz. Stoffaustausch	konstant 0,1 m ² /s	
Vertikaler Stoffaustausch	k-ε-Turbulenzmodell	
Geschiebetransport	Ja, zwei Fraktionen	
- Feinsand	mittlerer Korndurchmesser 125 µm	
- Grobsand	mittlerer Korndurchmesser 500 µm	

Die im Rahmen der Kalibrierung notwendig gewordene Zunahme des Bodenreibungskoeffizienten in der Außenems kann sich auf die ausbaubedingten Änderungen auswirken: Denn die relative Energiedissipation pro Wasservolumen ist durch den höheren Bodenreibungskoeffizienten ebenfalls erhöht. Bei gegebener Zunahme der Wassertiefe und damit gegebener Zunahme des Wasservolumens (gleichbedeutend mit dem Baggervolumen) steigt damit die Wirkung der Vertiefung auf die Abnahme der Energiedissipation und damit auf die Absenkung des Tideniedrigwassers. Da aber auch das Baggervolumen gegenüber dem Gutachten-Modell zugenommen hat und beide Effekte für sich betrachtet die Energiedissipation reduzieren und das Tideniedrigwasser absenken, kann der Einfluss der Zunahme der Bodenreibungskoeffizienten auf z.B. die Absenkung des Tideniedrigwassers nicht quantifiziert werden.

4 Abschätzung einer Kolk-Entwicklung nach Verlängerung des Bühnenpaares 6/7

Die Verlängerung des Bühnenpaares 6/7 führt zu einer Querschnittseinengung und in der Folge zu einer Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den zu verlängernden Bühnen. Zur Wirkung der Bühnenverlängerung auf die Strömungsgeschwindigkeiten siehe auch Kapitel 5.3. Diese Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten führt auch zu einer Zunahme der Bodenschubspannungen und kann damit zu erhöhter Erosion und zu einem Kolk führen.

Das vorhandene Modell der Ems kann ausgehend vom Ausbau-Zustand nicht für eine detaillierte Prognose der möglichen Kolk-Entwicklung herangezogen werden, weil die horizontale und zeitliche Auflösung dafür nicht ausreichend ist. Stattdessen wird das Modell genutzt, um für einen vorgegebenen, idealisierten Kolk im Ausbau-Zustand die resultierenden Bodenschubspannungen mit den Bodenschubspannungen im PIZ zu vergleichen. Sind die Bodenschubspannungen trotz idealisiertem Kolk größer als im PIZ, dann ist der Kolk noch nicht tief genug dimensioniert.

Der idealisierte Kolk ist kreisförmig zwischen den zu verlängernden Bühnen im Modell berücksichtigt worden. Innerhalb dieser kreisförmigen Fläche ist die Gewässertiefe im Ausbau-Zustand um ein konstantes Maß Δz vertieft worden. Die in Flusslängsrichtung ausgerichtete Ellipse beschreibt den Übergangsbereich, wo die Gewässertiefen anteilig vertieft werden: Genau auf dem Kreis beträgt die Vertiefung das Maß Δz , genau auf der Ellipse 0 m, dazwischen wird die Vertiefung linear interpoliert. Zur Lage des idealisierten Kolkes siehe Bild 7.

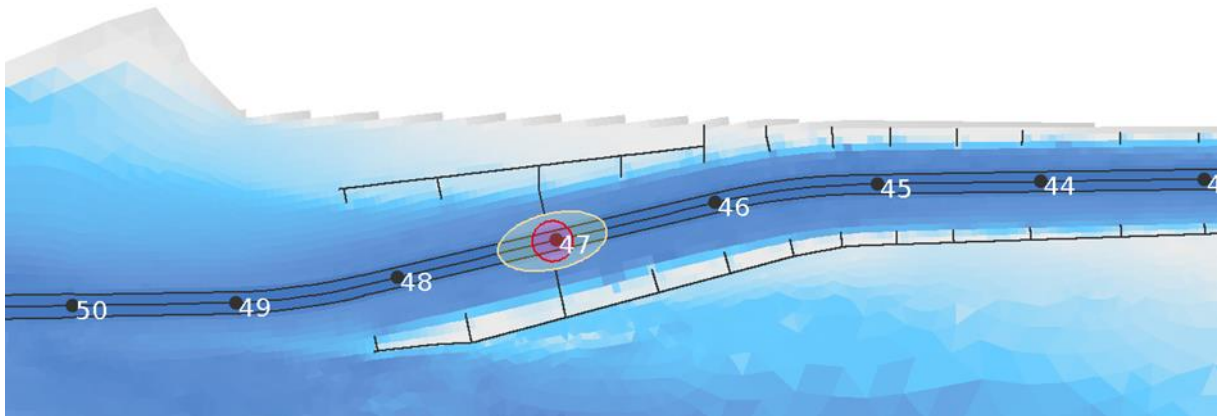


Bild 7: Lage des idealisierten Kolkes (Fläche innerhalb des roten Kreises) und des Übergangsbereichs (Fläche zwischen Kreis und in Flusslängsrichtung ausgerichteter Ellipse) zwischen den zu verlängernden Buhnen auf Höhe Ems-km 47.

Es sind insgesamt vier auf den Ausbau-Zustand aufbauende Modelle mit Kolk-tiefen Δz von 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m erstellt, simuliert und bezüglich der mittleren Bodenschubspannungen analysiert worden. Die mittleren Bodenschubspannungen werden für jeden Berechnungspunkt im Modell für jede der 28 Tiden des Analysezeitraums durch Mittelwertbildung der Zeitreihe der Momentan-Bodenschubspannungen zwischen den beiden Kenterzeitpunkten Ebbe der jeweiligen Tide berechnet und im zweiten Schritt über alle 28 Tiden gemittelt.

Bild 8 zeigt auf der linken Seite die analysierten mittleren Bodenschubspannungen für den PIZ, den AZ und die vier Ausbau-Zustände mit Kolken zwischen 0,5 m und 2,0 m Tiefe und auf der rechten Seite die Differenzen zwischen den mittleren Bodenschubspannungen des jeweiligen Ausbau-Zustands im Vergleich mit PIZ. Die Analyse der mittleren Bodenschubspannungen zeigt, dass im Emdener Fahrwasser die mittleren Bodenschubspannungen von Emden in Richtung Westen abnehmen. Das deckt sich mit der Aussage des WSA Ems-Nordsee, dass der westliche Teil des Emdener Fahrwassers und der sich im Westen anschließende Teil der Fahrrinne bis Ems-km 53 für die größten Baggermengen im Jahresdurchschnitt sorgen. Die Bodenschubspannungen sind zu klein, um zu einem Gleichgewicht zwischen dem Erosions- und dem Depositionsfluss von Schwebstoffen zu führen.

Die Darstellungen der Unterschiede zum PIZ auf der rechten Seite zeigen die Zunahmen der Bodenschubspannungen zwischen den zu verlängernden Buhnen sowie die Abnahmen im Strömungsschatten der zu verlängernden Buhnen und im Bereich der Wendestelle. Diese Änderungen erklären sich über die Zu- und Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeit – die Bodenschubspannung (τ_b) ist proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit u – und über die Vertiefung der Fahrrinne und die Herstellung der Wendestelle – die Bodenschubspannung ist umgekehrt proportional zum Quadrat des natürlichen Logarithmus der Wassertiefe z :

$$\tau_b \propto \frac{u^2}{\ln(z)^2}$$

Das bedeutet, dass eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit oder eine Abnahme der Wassertiefe zu einer Zunahme der Bodenschubspannung führt und umgekehrt, dass eine Abnahme der

Strömungsgeschwindigkeit oder eine Zunahme der Wassertiefe zu einer Abnahme der Bodenschubspannung führt. Wobei der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Bodenschubspannung prinzipiell größer ist, weil die Wassertiefe über den Logarithmus mit der Bodenschubspannung in Beziehung steht.

Mit Blick auf den Kolk-Bereich zeigen die Darstellungen der Unterschiede zum PIZ auch, dass die Zunahmen der Bodenschubspannungen im Bereich des idealisierten Kolkes geringer werden, je tiefer der Kolk ist. Für den Ausbau-Zustand mit 1,5-m-Kolk sind die Änderungen bezogen auf PIZ größtenteils nahe Null (kleiner als die Darstellungsgenauigkeit von $\pm 0,01 \text{ N/m}^2$). für den Ausbau-Zustand mit 2,0-m-Kolk sind die Änderungen bezogen auf PIZ negativ, das heißt, die Bodenschubspannungen sind mit 2,0-m-Kolk kleiner als im planerischen Ist-Zustand.

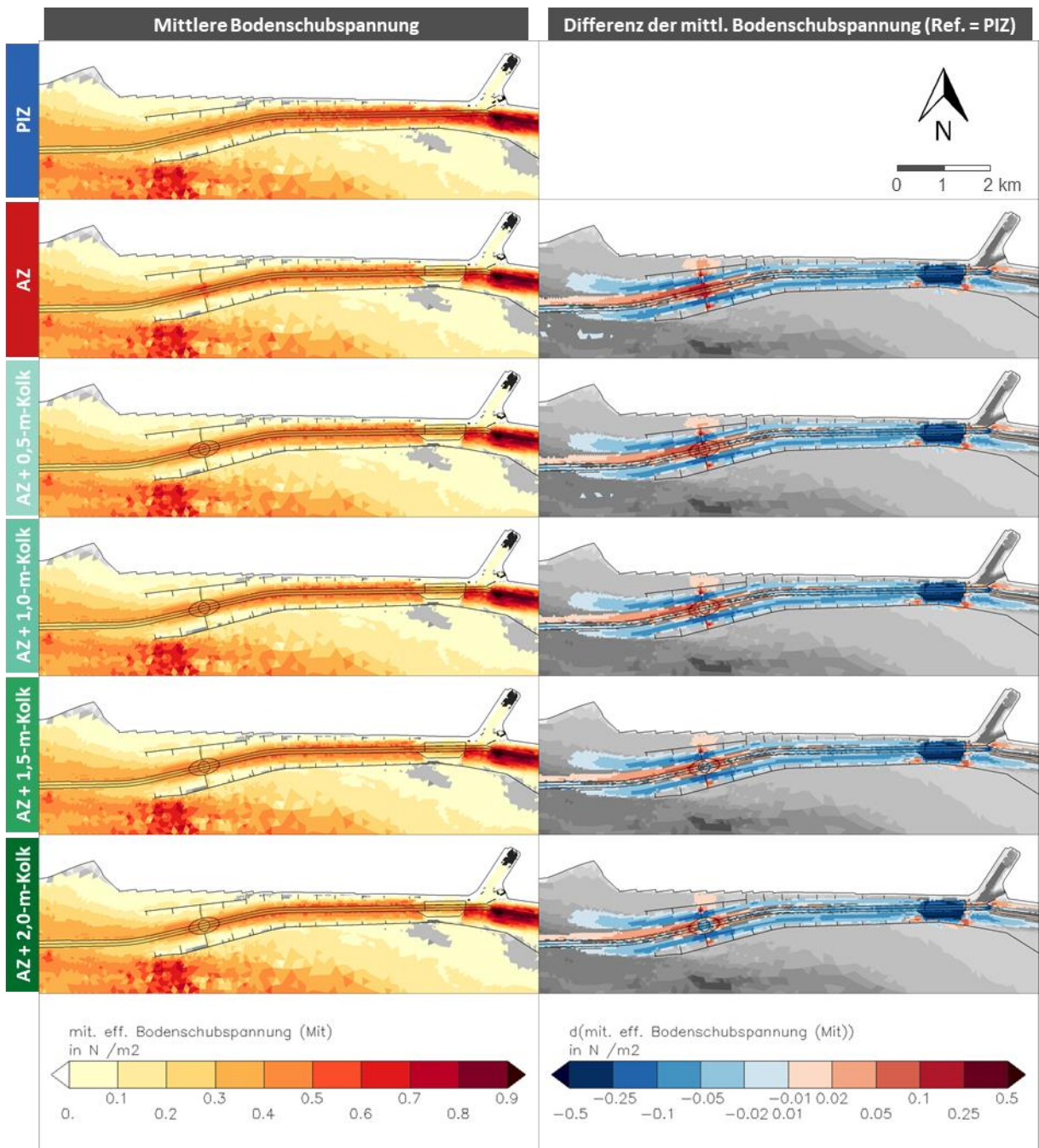


Bild 8: Draufsicht auf die mittlere Bodenschubspannung im Bereich des Emders Fahrwassers. Von oben nach unten sind die Zustände planerischer Ist-Zustand (PIZ), Ausbau-Zustand (AZ) und der AZ mit idealisiertem Kolk der Tiefe 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m dargestellt. Links die mittlere Bodenschubspannung, gemittelt über alle 28 Tiden des Analysezeitraums. Blassgelbe Farben stehen für geringe mittlere Bodenschubspannungen, dunkelrote Farben für hohe Bodenschubspannungen. Rechts die Differenz der mittleren Bodenschubspannung bezogen auf PIZ. Blaue Farben stehen für Abnahmen der Bodenschubspannung im Vergleich zum PIZ, rote Farben für Zunahmen der Bodenschubspannung im Vergleich zum PIZ. Im Bereich der Querschnittseinengung ist mit einer Ellipse und einem Kreis der Bereich hervorgehoben, wo der Kolk im Modell berücksichtigt ist.

Eine weitere Mittelung der mittleren Bodenschubspannungen und deren Änderungen (bezogen auf PIZ) über die kreisförmige Kolk-Fläche zeigt Bild 9:

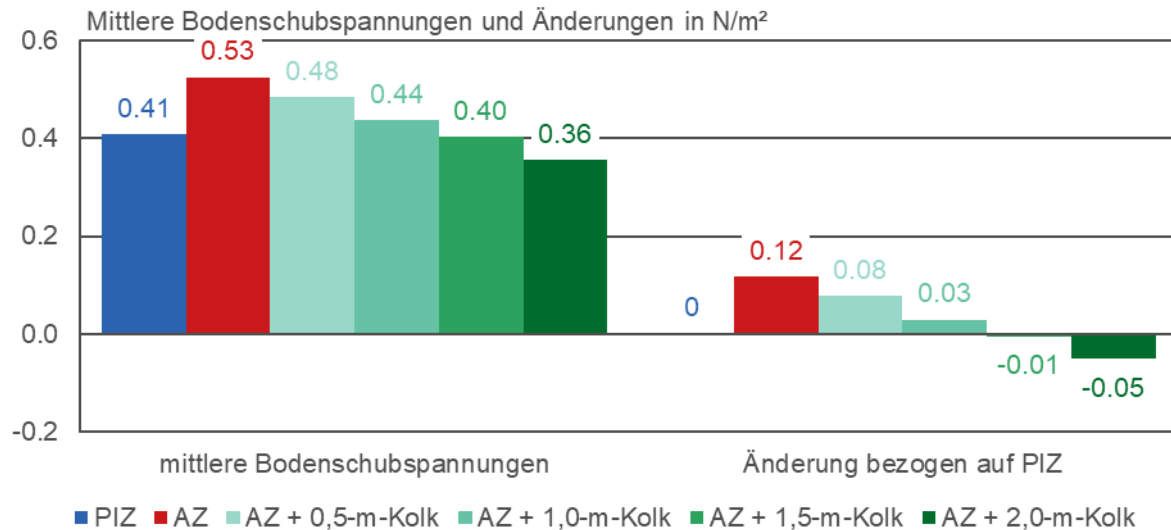


Bild 9: Darstellung der gebietsgemittelten mittleren Bodenschubspannung für den Bereich des idealisierten Kolkes für die Zustände PIZ (blau), AZ (rot) und für die Ausbau-Zustände mit idealisiertem Kolk (grün, je intensiver, desto tiefer der Kolk) auf der linken Seite und deren Unterschiede bezogen auf PIZ auf der rechten Seite.

Im Ausbau-Zustand ohne Kolk steigt die mittlere Bodenschubspannung für den Bereich zwischen den zu verlängernden Bühnen an, trotz Zunahme der Wassertiefe durch die geplante Vertiefung der Fahrrinne. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen durch die Einengung des Strömungsquerschnitts zu, dieser Effekt überwiegt gegenüber der Zunahme der Wassertiefe. Mit einem idealisierten Kolk nehmen die Wassertiefen weiter zu, was für sich genommen bereits zu einer Abnahme der Bodenschubspannungen führt. Zusätzlich nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten weniger zu als im Ausbau-Zustand ohne Kolk, weil sich der Strömungsquerschnitt wieder vergrößert. Für den Ausbau-Zustand mit 1,5-m-Kolk ergeben sich etwa wieder die mittleren Bodenschubspannungen wie im PIZ, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich ein großflächiger Kolk zwischen den zu verlängernden Bühnen maximal mit einer zusätzlichen Tiefe von 1,5 m einstellt.

Hinweise:

1. Die hier vorgenommene Abschätzung basiert darauf, dass die im PIZ vorhandenen Bodenschubspannungen nicht groß genug für eine Kolkbildung sind. Dies ist gegeben, weil dieser Streckenabschnitt der Fahrrinne als Baggerstrecke bekannt ist – der Erosionsfluss ist kleiner als der Depositionsfluss.
2. Der Bereich des Kolkes ist derzeit eine Baggerstrecke, Erosions- und Depositionsfluss stehen nicht im Gleichgewicht. Es darf deshalb angenommen werden, dass eine (moderate) Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten nicht sofort zu einer Kolkbildung führt, sondern in diesem Bereich nur die Baggermengen abnehmen. Die hier vorgenommene Abschätzung kann jedoch keinen Grenzwert für die Strömungszunahmen benennen, bis zu

denen sich (gerade eben) noch kein Kolk bildet. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Kolkentiefe tatsächlich geringer ausfallen wird, als hier genannt.

3. Die hier vorgenommene Abschätzung trifft keine Aussage zur Fläche des Kolkes. Hier wurde die Fläche kreisförmig gewählt, so dass die Strömung den durch den Kolk erweiterten Strömungsquerschnitt auch nutzen kann. Die Fläche könnte auch größer ausfallen, wie die Zunahmen der Bodenschubspannungen stromauf und stromab des idealisierten Kolkes anzeigen. Aber auch hier gilt Hinweis 2: Dieser Bereich ist derzeit eine Baggerstrecke, (moderate) Zunahmen der Bodenschubspannung führen nicht gleich zu einer Kolkbildung.
4. Eine Kolkentwicklung hängt nicht nur von der Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (und der Änderung der Wassertiefe) ab, sondern auch von der Zunahme des turbulenten Anteils der Strömungsgeschwindigkeit, also in Bezug auf die Modellauflösung kleinräumigen und kurzzeitigen Fluktuationen der Strömungsgeschwindigkeit. Dieser Anteil dürfte dort groß werden, wo die zusätzliche Querströmung, verursacht durch die Bühnenverlängerung, auf die Längsströmung trifft, also in der Nähe der Bühnenköpfe der zu verlängernden Bühnen. Hier könnte eine kleinräumige (nicht den ganzen Querschnitt betreffende) Kolkbildung stattfinden, die auch mehrere Meter Tiefe erreichen kann. Diese kleinräumige Kolkbildung wird in der hier vorgenommenen Abschätzung nicht abgebildet. Sollten diese Prozesse lokal eine Rolle spielen, dann wäre die globale Wirkung wie folgt: Durch die zusätzliche Turbulenz in diesem Bereich ist die Energiedissipation (etwas) größer, das Tideprisma wird (etwas) reduziert, das Tideniedrigwasser (etwas) mehr angehoben, als vom Modell prognostiziert. Insofern stellen die Modellergebnisse ohne diese die Turbulenz betreffenden Effekte eine Worst-Case-Betrachtung bezüglich des residuellen Stromauf-Transportes von Schwebstoffen dar, von dem prinzipiell angenommen werden kann, dass er zunimmt, je mehr Tideenergie in die Unterems gelangt.

5 Vergleich der Analyse-Ergebnisse zu den ausbaubedingten Änderungen

Für die folgende vergleichende Betrachtung der ausbaubedingten Änderungen wird zusätzlich zum Ausbau-Zustand ohne Kolk auch der Ausbau-Zustand mit einem idealisierten Kolk von 1,5 m Tiefe berücksichtigt. Dies geschieht im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung, denn der Ausbau-Zustand mit Kolk reduziert das Maß der Querschnittseinengung durch die zu verlängernden Bühnen. Entsprechend ist auch die gewollte Wirkung der Querschnittseinengung auf die Hydrodynamik und den Schwebstoff-Transport in der Unterems reduziert.

5.1 Erläuterungen zu den Tidekennwert-Analysen und den Darstellungen

Auf den nachfolgenden Seiten werden ausgewählte Tidekennwerte und deren ausbaubedingte Änderungen in Profil-Längsschnitten dargestellt. Die Darstellungen entsprechen nachfolgendem Muster:

- Jeweils oben erfolgt die Darstellung des Tidekennwertes für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) des aktuellen Modells. In Grau 28 Linien für jede der 28 Tiden des Analysezeitraums und in Grün eine Linie für den Mittelwert über die 28 Tiden.

- In der Mitte erfolgt die Darstellung der Differenzen des Ausbau-Zustands (AZ) minus planerischen Ist-Zustand (PIZ) des aktuellen Modells. In Grau 28 Linien für die Differenz für jede der 28 Tiden des Analysezeitraums und in Rot eine Linie für die mittlere Differenz über die 28 Tiden. Diese mittlere Differenz wird zu Vergleichszwecken im unteren Diagramm erneut dargestellt (rote Linie).
- Unten erfolgt die vergleichende Darstellung der mittleren Differenzen (AZ minus PIZ) für drei verschiedene Ausbau- und planerische Ist-Zustände: für den aktuellen Ausbau-Zustand in Rot, für den aktuellen Ausbaustand unter Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes zwischen den zu verlängernden Buhnen in Orange und für den ehemaligen Ausbau-Zustand (AZ=AZ1) minus planerischen Ist-Zustand (PIZ=PS2) aus dem Gutachtenmodell von 2012 in Dunkelgrau.

Die Berechnung der Tidekennwerte erfolgt im Längsschnitt grundsätzlich in Fahrrinnenmitte. Davon ausgenommen sind nur die Tidekennwerte des Schwebstofftransports: Zur Bestimmung der Transporte werden im Modell in regelmäßigen Abständen Querprofile definiert (siehe Bild 10) und die Transporte aller zum jeweiligen Querprofil zugehörigen Gitterkanten des Modells werden zu einer Querprofil-Transport-Zeitreihe zusammengefasst (integriert). Für diese Zeitreihen werden im Anschluss die Tidekennwerte analysiert. Die Darstellung erfolgt dann in einem Längsprofil, wobei die Tidekennwerte jedes Querprofils der zugehörigen Position im Längsprofil zugeordnet werden.

Der Abstand zwischen zwei Querprofilen beträgt im Dortmund-Ems-Kanal (DEK) und in der Unterems bis Ems-km 48 einen Kilometer, in der Außenems ab Ems-km 48 zwei Kilometer. Die im Gutachten 2012 dargestellten Transport-Analysen wurden damals in der Unterems mit einem Abstand von 500 m durchgeführt. Die hier zum Vergleich erneut dargestellten Ergebnisse aus dem Gutachten 2012 enthalten abweichend zur Darstellung im Gutachten 2012 nur die Datenpunkte alle 1 km. Dies ist zu Vergleichszwecken ausreichend, denn die ausbaubedingten Änderungen der Transporte sind zumeist stetige Kurven. Interpolationen zwischen zwei Stützstellen führen zu geringen Abweichungen.

Die Querprofile reichen in der Außenems ab Ems-km 68 nicht mehr von Ufer zu Ufer, sondern nur bis zum Wattrücken des Randzel-Watts. Das bedeutet, dass die Transporte durch die Osterems abweichend zu 2012 in den Transport-Analysen nicht mehr enthalten sind. Die absoluten Transporte sind damit dem Betrag nach kleiner, denn es werden nur noch die Transporte durch die Westerems bilanziert. Die ausbaubedingten Änderungen können somit aber auf die Westerems referenziert werden. Eventuell vorhandene Änderungen einer Zirkulationsströmung um Borkum herum können so sichtbar gemacht werden.

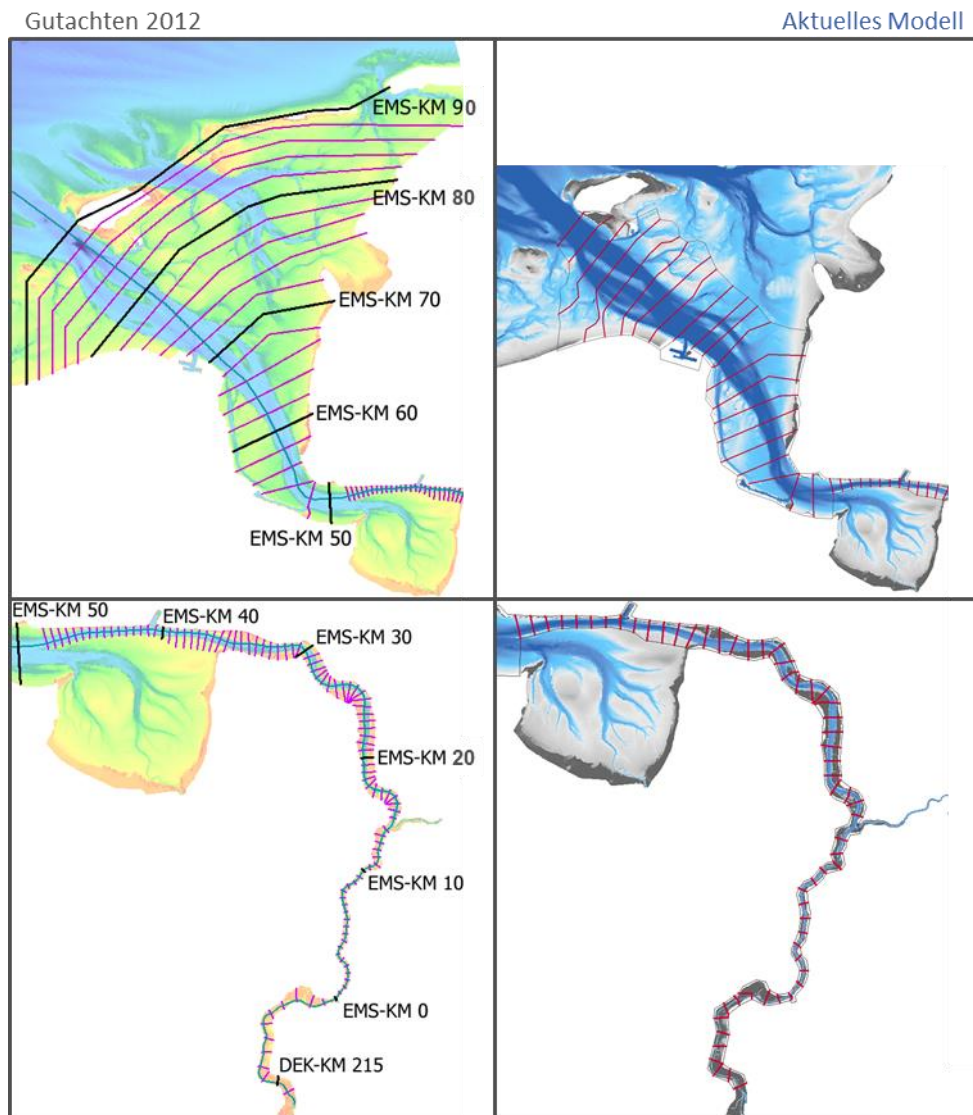


Bild 10: Darstellung der analysierten Querprofile im Vergleich. Links für das Gutachten-Modell 2012 mit den Querprofilen in der Außenems von Deich zu Deich und einem Querprofilabstand von 500 m in der Unterems. Rechts für das aktuelle Modell mit den Querprofilen in der Außenems, die nur die Westerems abdecken und einem Querprofilabstand von 1 km in der Unterems.

Zur Berechnung der advektiven Flut- und Ebbestrom-Transporte von Schwebstoffen wird zuerst das Produkt der Strömungsgeschwindigkeit und des Schwebstoffgehalts für jeden 3D-Datenpunkt aller Querprofile und für jeden Zeitpunkt gebildet. Das Ergebnis ist eine Transport-Zeitreihe für jeden 3D-Datenpunkt aller Querprofile, die angibt, welche Schwebstoffmassen pro Sekunde und pro m^2 transportiert werden. Diese Transport-Zeitreihen werden anschließend über die Querprofilflächen und über die Flutstrom-, bzw. Ebbestromdauern integriert, um die Masse der Schwebstoffe zu bestimmen, die durch jedes Querprofil während einer Flutstrom- bzw. Ebbestromdauer transportiert worden sind. Abschließend bildet die Differenz aus Ebbestrom- minus Flutstrom-Transport den Netto-Transport. Ist dieser kleiner als Null, dann ist der Transport mit dem Flutstrom größer als der Transport mit dem Ebbestrom.

5.2 Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Wasserstand

Wie im Gutachten 2012 geschrieben bestimmt die Querschnittseinengung durch die Verlängerung des Buhnenpaares 6/7 die Qualität der ausbaubedingten Änderungen. Das bedeutet, dass seewärts bis zur Querschnittseinengung (in den Längsprofil-Darstellungen mit „B67“ gekennzeichnet) der Tidehub zunimmt, stromauf der Querschnittseinengung der Tidehub abnimmt. Die Tidehub-Änderungen resultieren größtenteils aus den Änderungen im Tideniedrigwasser.

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 11, Bild 12 und Bild 13) zeigt, dass die Anhebung des Tideniedrigwassers stromauf der Querschnittseinengung aktuell geringer ausfällt als 2012 prognostiziert. Dies hat zwei Gründe: Erstens ist das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes größer als 2012 prognostiziert (2,7 Mio m³ im Vergleich zu 1,8 Mio m³). Damit würde ohne Querschnittseinengung das Tideniedrigwasser weiter absinken, als 2012 prognostiziert, weil der Reibungseinfluss auf die Dissipation der Tideenergie weiter abnimmt und damit im Vergleich mehr Tideenergie als mechanische Energie zur Verfügung steht. Die Querschnittseinengung hebt das Tideniedrigwasser wieder an, aber von einem niedrigeren Niveau aus. Zweitens ist durch die Berücksichtigung des Eingriffshorizonts die ausbaubedingte Zunahme der Gewässertiefe im Bereich der Querschnittseinengung vergrößert (siehe Kapitel 3.1 Abschnitt 1) und die Abbildung der Höhenlage der zu verlängernden Buhnen verbessert (siehe Kapitel 3.2). Beides reduziert die Wirkung der Buhnenverlängerung, denn die Reduzierung der durchströmten Querschnittsflächen ist verringert. Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten wird zeigen, dass die Änderungen durch die aktuelle Querschnittseinengung somit etwas geringer ausfallen (siehe Kapitel 5.3).

Im räumlich eng begrenzten Übergangsbereich zur Unterems bei Ems-km 40,7 ist das Tideniedrigwasser im Gutachten-Modell ausbaubedingt sichtbar angehoben. Zu erkennen am Peak in der Differenz-Darstellung. Dies tritt im aktuellen Modell nur noch in einem geringen Umfang auf, weil im aktuellen Modell der Sohlprung im Übergang vom Emden Fahrwasser zur Unterems nur in geringem Umfang ausbaubedingt gebaggert werden muss (siehe auch Kapitel 3.1 Abschnitt 3).

Die Grundaussage aus 2012, wonach das Tideniedrigwasser in der Unterems um bis zu 1 cm angehoben wird, bleibt aber weiterhin gültig. Erst mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes zwischen der geplanten Buhnenverlängerung ist die Anhebung des Tideniedrigwassers aufgehoben und der Tidehub in der Unterems genauso hoch wie im planerischen Vergleichszustand.

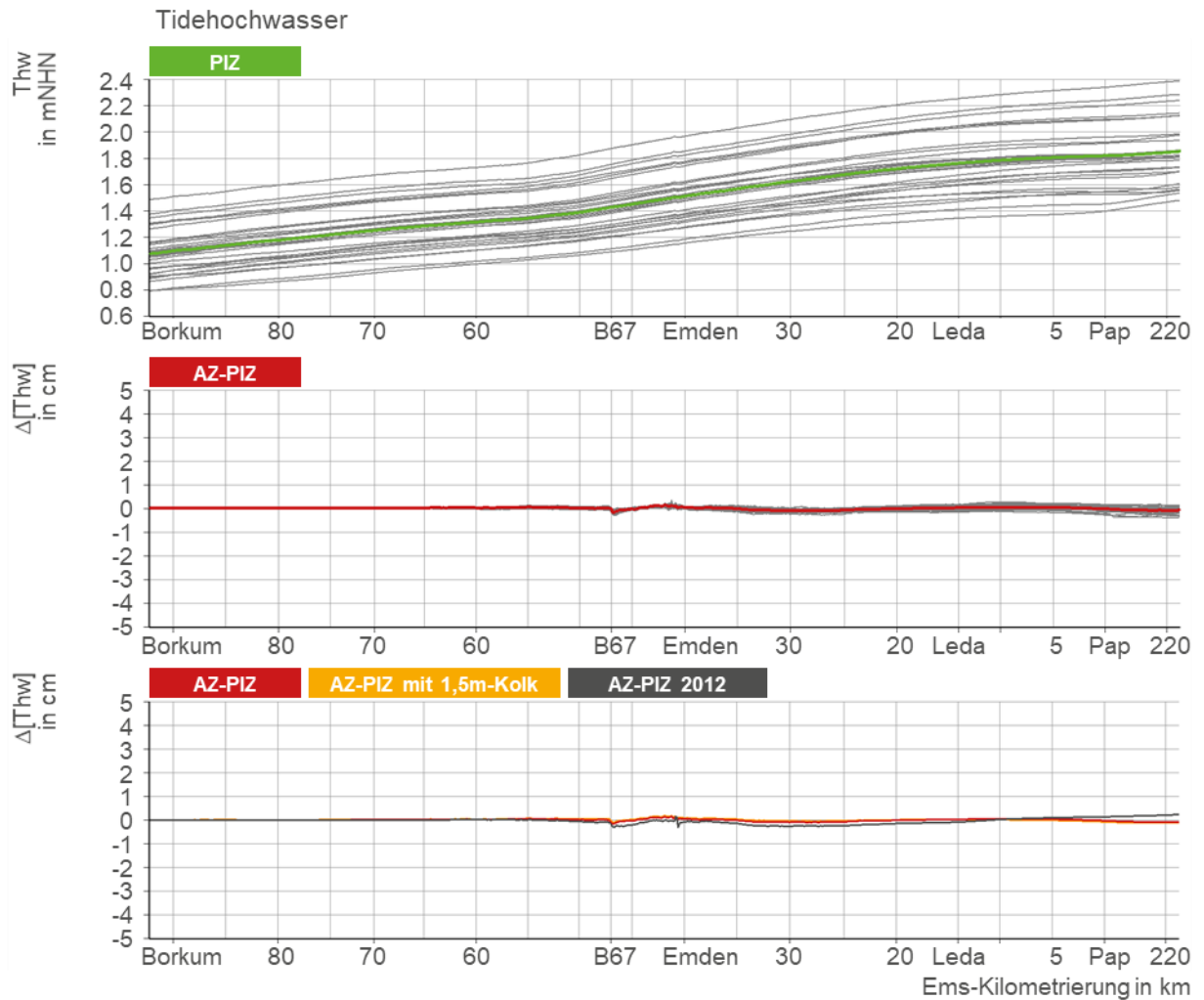


Bild 11: Tidehochwasser und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Tidehochwasser im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und das über alle Tiden gemittelte Tidehochwasser (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

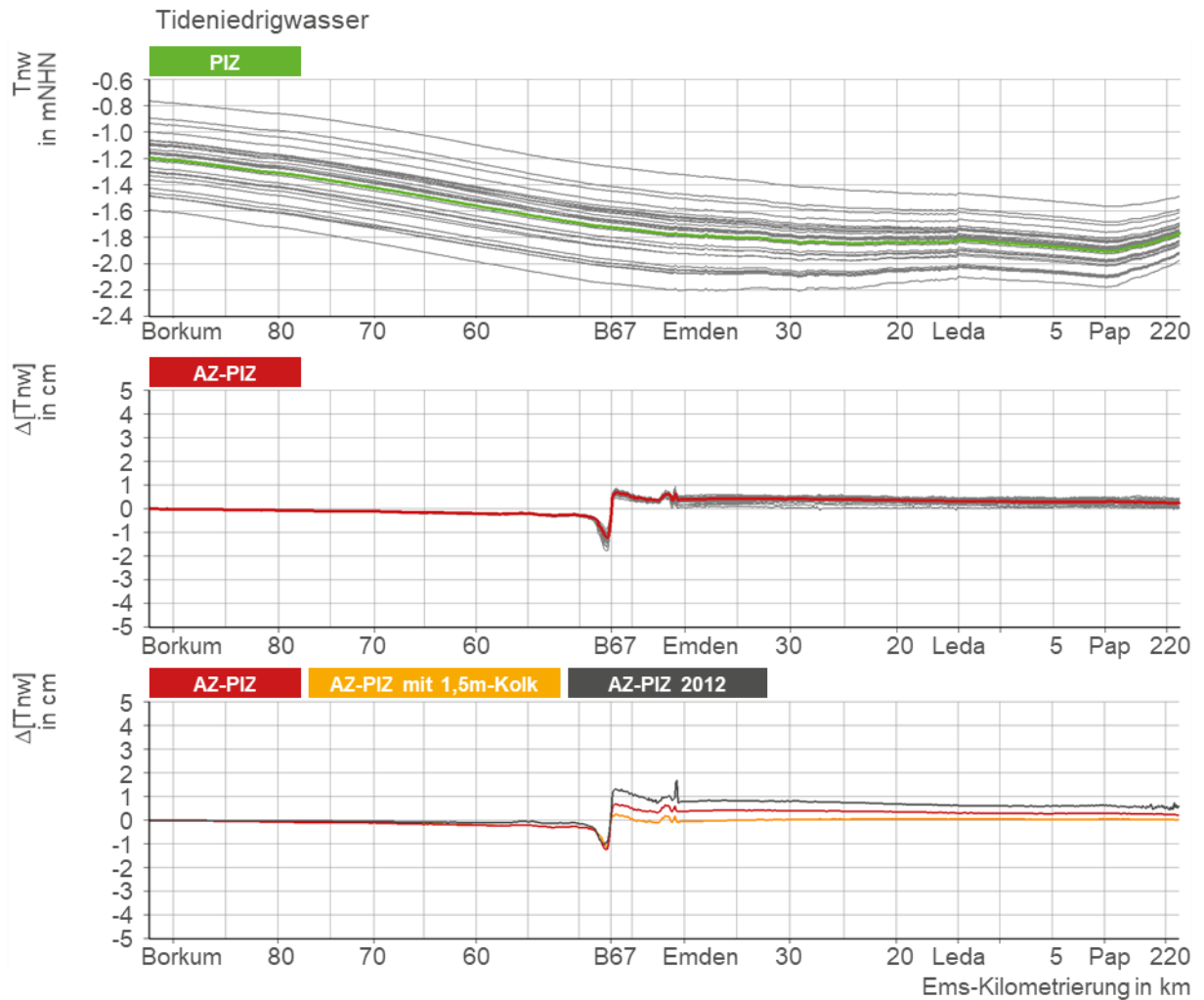


Bild 12: Tideniedrigwasser und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Tideniedrigwasser im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und das über alle Tiden gemittelte Tidehochwasser (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

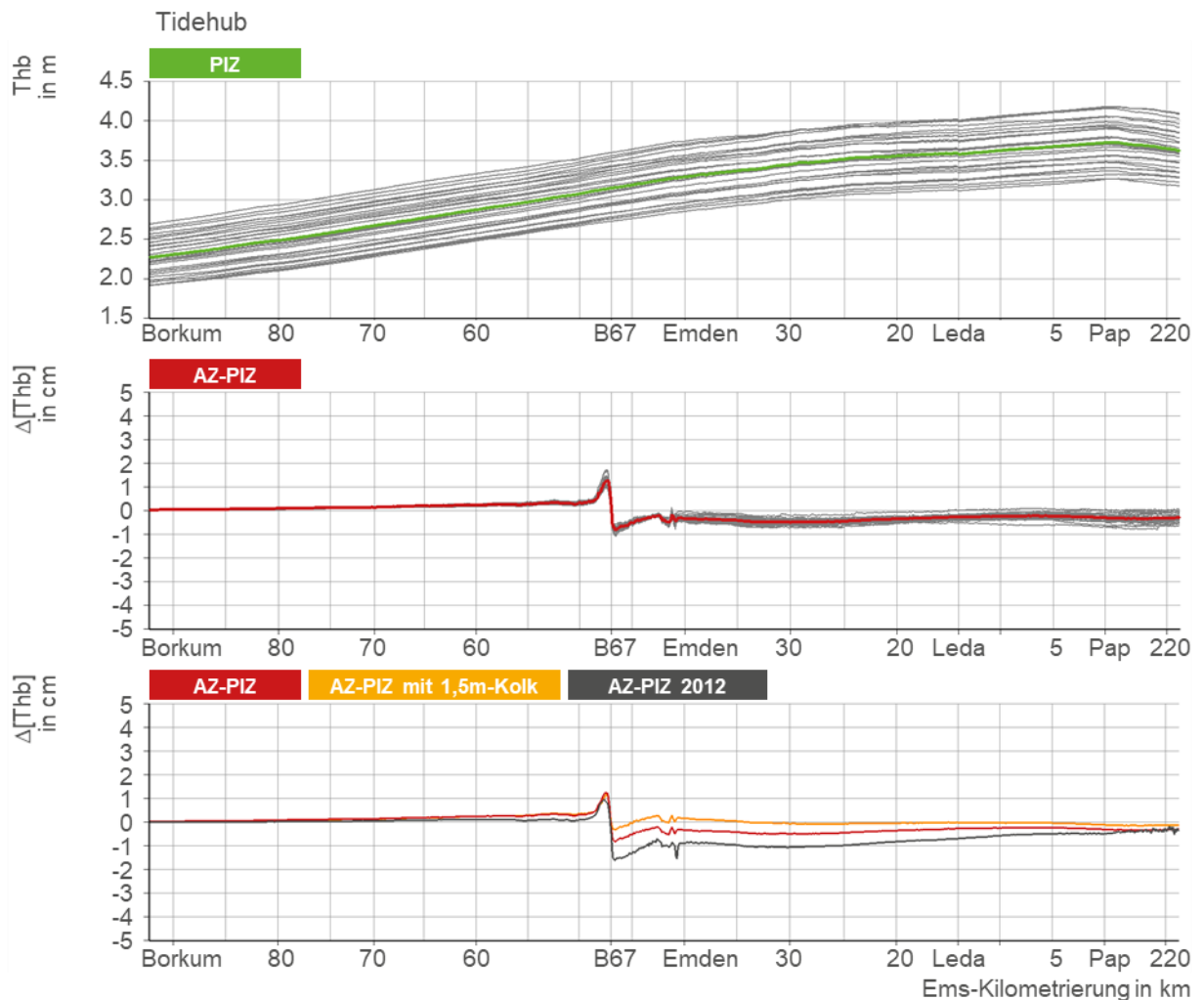


Bild 13: Tidehub und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Tidehub im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte Tidehub (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

5.3 Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Strömungsgeschwindigkeit

Wie im Gutachten 2012 geschrieben gilt, dass die Querschnittseinengung diejenige Einzelmaßnahme des Ausbauvorhabens mit der größten Einzelwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeit ist. Das bedeutet, dass die Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter der Querschnittseinengung in der Fahrrinne zunehmen und im Stromschatten der verlängerten Buhnen abnehmen. Die für den Wassertransport zur Verfügung stehende Querschnittsfläche wird kleiner, die Strömung fokussiert sich auf diesen Querschnitt. Dabei stellen sich in Längsrichtung höhere

Wasserspiegelgradienten ein, die die Strömung stärker beschleunigen. Trotz der Strömungsgeschwindigkeitszunahmen im verbliebenen Querschnitt nimmt das Tideprisma in diesem Querschnitt ab: Denn ein Teil der einlaufenden Tideenergie wird an der Querschnittseinengung reflektiert und ein weiterer Anteil durch zusätzliche Turbulenz und erhöhte Reibung dissipiert, so dass weniger Tideenergie in Richtung Emden und in die Unterems gelangt. Das zeigt sich z.B. am reduzierten Tidehub, gleichbedeutend mit einer verringerten Auslenkung des Wasserstands aus der Ruhelage (Ruhelage = Tidemittelwasser).

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 14 und Bild 15 für die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten und Bild 16 und Bild 17 für die mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten) zeigt für den Bereich der Querschnittseinengung (B67), dass die Zunahmen der Flutstromgeschwindigkeiten stromauf der Querschnittseinengung und der Ebbestromgeschwindigkeiten stromab der Querschnittseinengung geringer ausfallen als im Gutachten 2012 gezeigt. Die lokalen Beschleunigungen des Wasserkörpers nehmen weniger zu, weil die Wasserspiegelgradienten weniger zunehmen. Diese Reduzierung der Zunahmen hat zwei Ursachen:

1. Durch die Berücksichtigung des Eingriffshorizonts ist die Tiefenzunahme in der Fahrrinne im Bereich der Querschnittseinengung größer als 2012. Gemeinsam führen die Vertiefung der Fahrrinne als Querschnittsaufweitung und die Bühnenverlängerung als Querschnittseinengung aktuell zu einer geringeren Querschnittseinengung als 2012.
2. Durch die höhere Auflösung der Gitterkanten-Höhen (siehe Kapitel 0) kann die Querschnittseinengung planähnlicher approximiert werden. Im Ergebnis führt dies zu einer geringeren Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung.

Die Aussagen aus dem Gutachten 2012 können bezüglich der Wirkung der Querschnittseinengung auf die Strömungsgeschwindigkeiten als eine Maximal-Abschätzung betrachtet werden, die jetzt nach unten korrigiert werden kann. Eine weitere Folge ist, dass die Wirkung der Querschnittseinengung auf die Anhebung des Tideniedrigwassers stromauf der Querschnittseinengung auch geringer ausfällt (siehe Kapitel 5.2).

Die Grundaussage aus 2012, wonach die Strömungsgeschwindigkeiten durch die Querschnittseinengung angehoben werden, bleibt aber weiterhin gültig. Die im Gutachten genannten Zahlen (ausbaubedingte Zunahmen um bis zu 0,3 m/s für die maximale Flutstromgeschwindigkeit und bis zu 0,35 m/s für die maximale Ebbestromgeschwindigkeit) sind im aktuellen Modell aber niedriger. Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes zwischen der geplanten Bühnenverlängerung fällt die Querschnittseinengung noch geringer aus, entsprechend reduzieren sich die ausbaubedingten Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeiten weiter. Aber auch mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes muss mit ausbaubedingten Zunahmen der Strömung gerechnet werden: Plus 0,25 m/s für die maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit und plus 0,15 m/s für die mittlere Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit. Die Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes verändert die Strömungsgeschwindigkeiten nur vor und hinter der Querschnittseinengung. Weiter entfernt sind die Strömungsänderungen ohne und mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes nicht zu unterscheiden.

Die geplante Wendestelle kurz vor Emden führt zu einer Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit als Folge der Querschnittsaufweitung durch Vertiefung und insbesondere Verbreiterung der Fahrrinne. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass diese Abnahmen im aktuellen Modell größer ausfallen, also die Querschnittsaufweitung effektiv größer ist. Der im Gutachten genannte Wert für die maximale Abnahme von 0,15 m/s muss auf 0,2 m/s korrigiert werden. Der Grund für die Zunahme ist das größere Baggervolumen zur Herstellung der Tiefen im Bereich der Wendestelle unter Berücksichtigung des Eingriffshorizonts (siehe Kapitel 3.1 Abschnitt 1).

Im räumlich eng begrenzten Übergangsbereich zur Unterems bei Ems-km 40,7 sind die Strömungsgeschwindigkeiten im Gutachten-Modell ausbaubedingt deutlich reduziert. Zu erkennen am Peak in den jeweiligen Darstellungen der Strömungsdifferenzen. Dies tritt im aktuellen Modell nur noch in einem geringen Umfang auf, weil im aktuellen Modell der Sohl sprung im Übergang vom Emder Fahrwasser zur Unterems nur in geringem Umfang ausbaubedingt gebaggert werden muss (siehe auch Kapitel 3.1 Abschnitt 3).

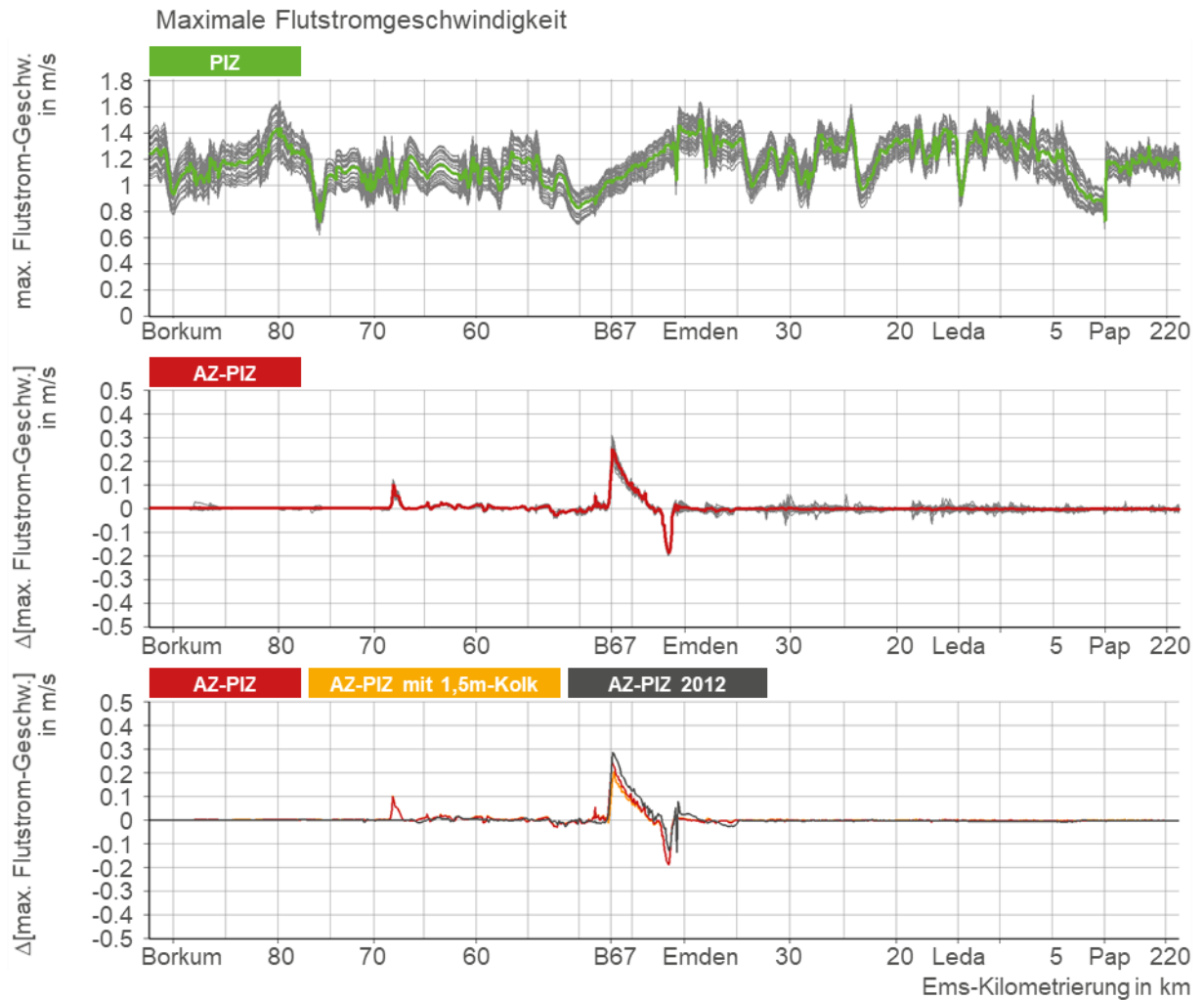


Bild 14: Tiefengemittelte maximale Flutstromgeschwindigkeit und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Maximale Flutstromgeschwindigkeit im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die über alle Tiden gemittelte maximale Flutstromgeschwindigkeit (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

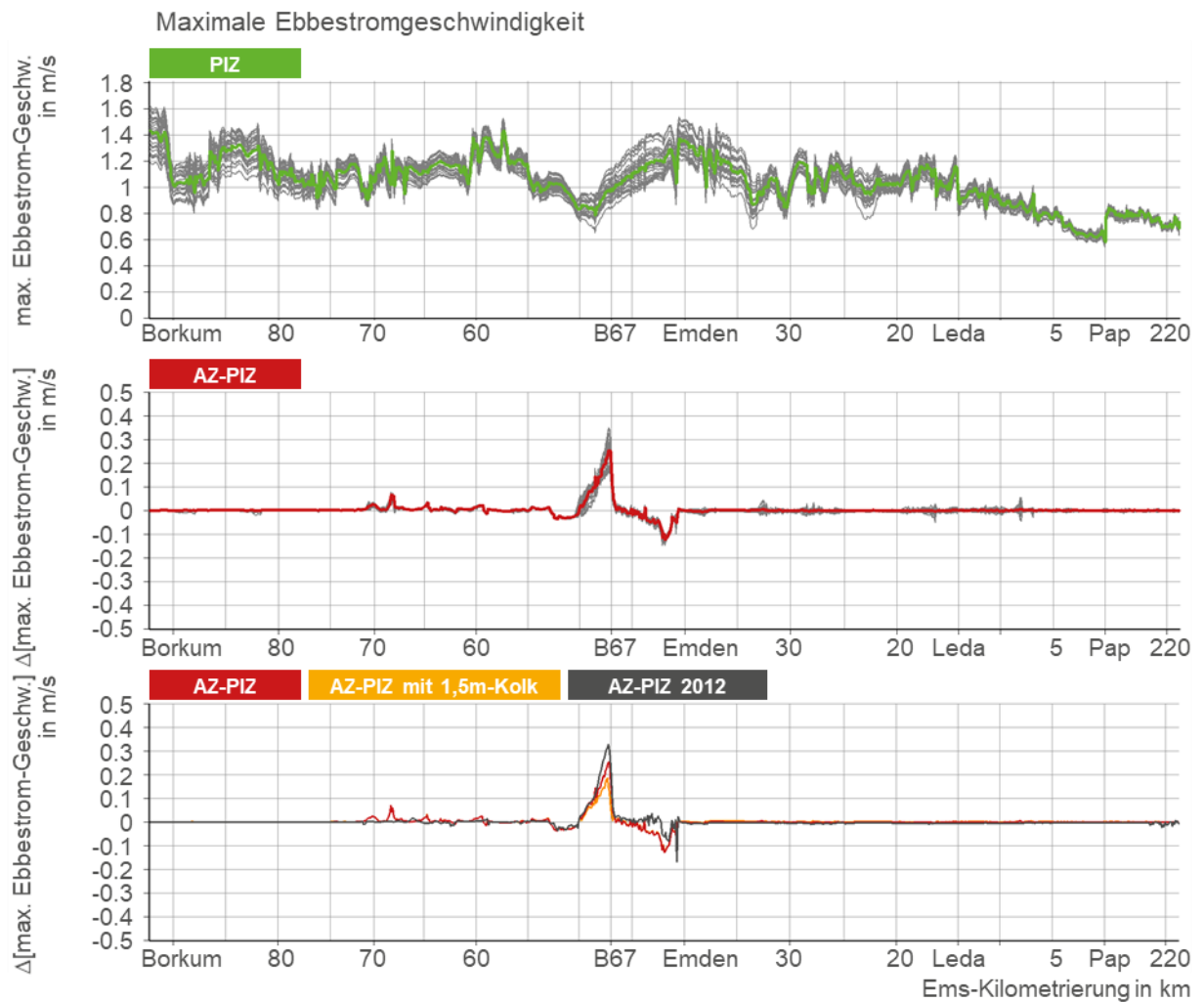


Bild 15: Tiefengemittelte maximale Ebbestromgeschwindigkeit und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Maximale Ebbestromgeschwindigkeit im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die über alle Tiden gemittelte maximale Ebbestromgeschwindigkeit (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

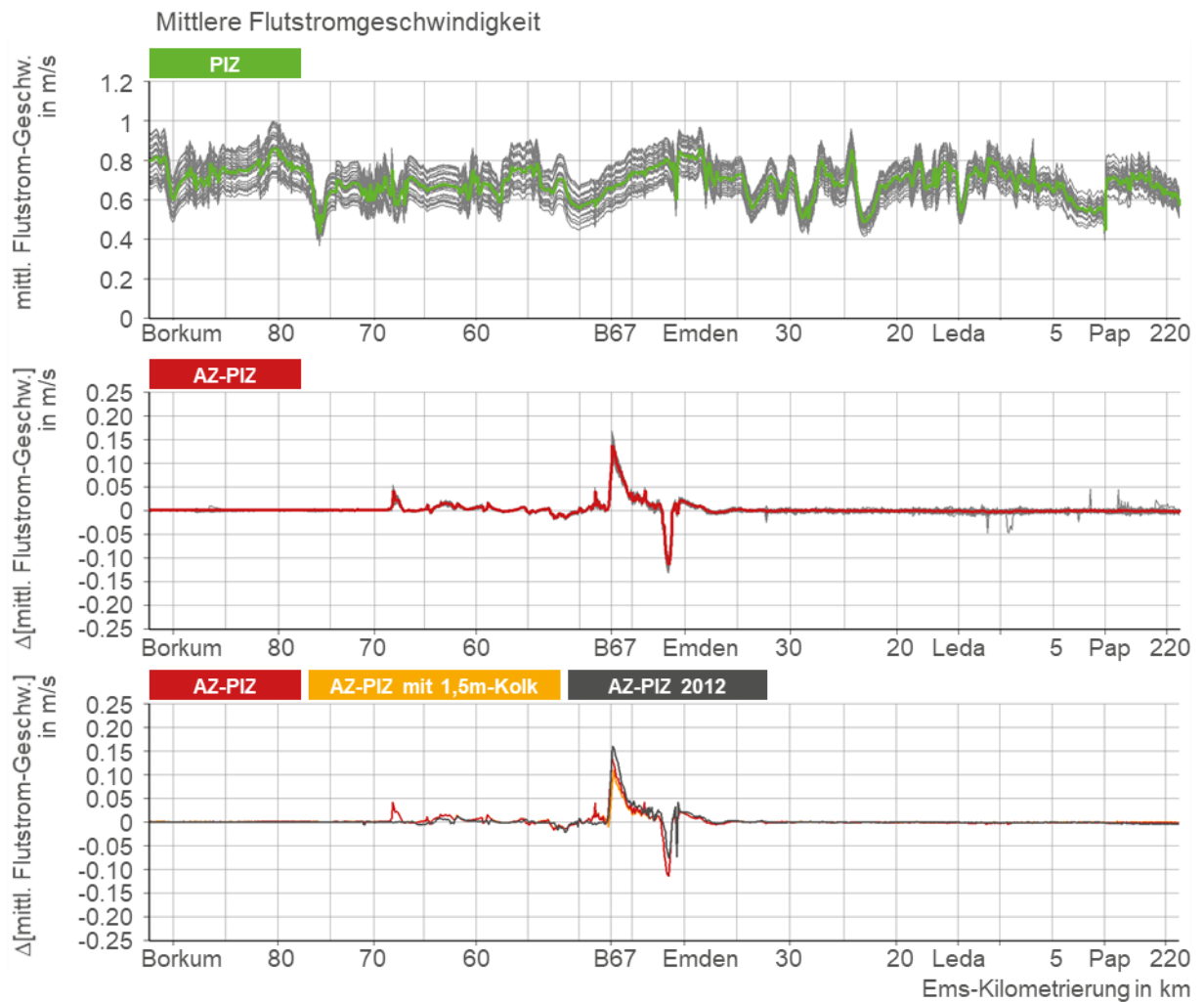


Bild 16: Tiefengemittelte mittlere Flutstromgeschwindigkeit und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums 2015 (grau) und die über alle Tiden gemittelte mittlere Flutstromgeschwindigkeit (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analysezeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

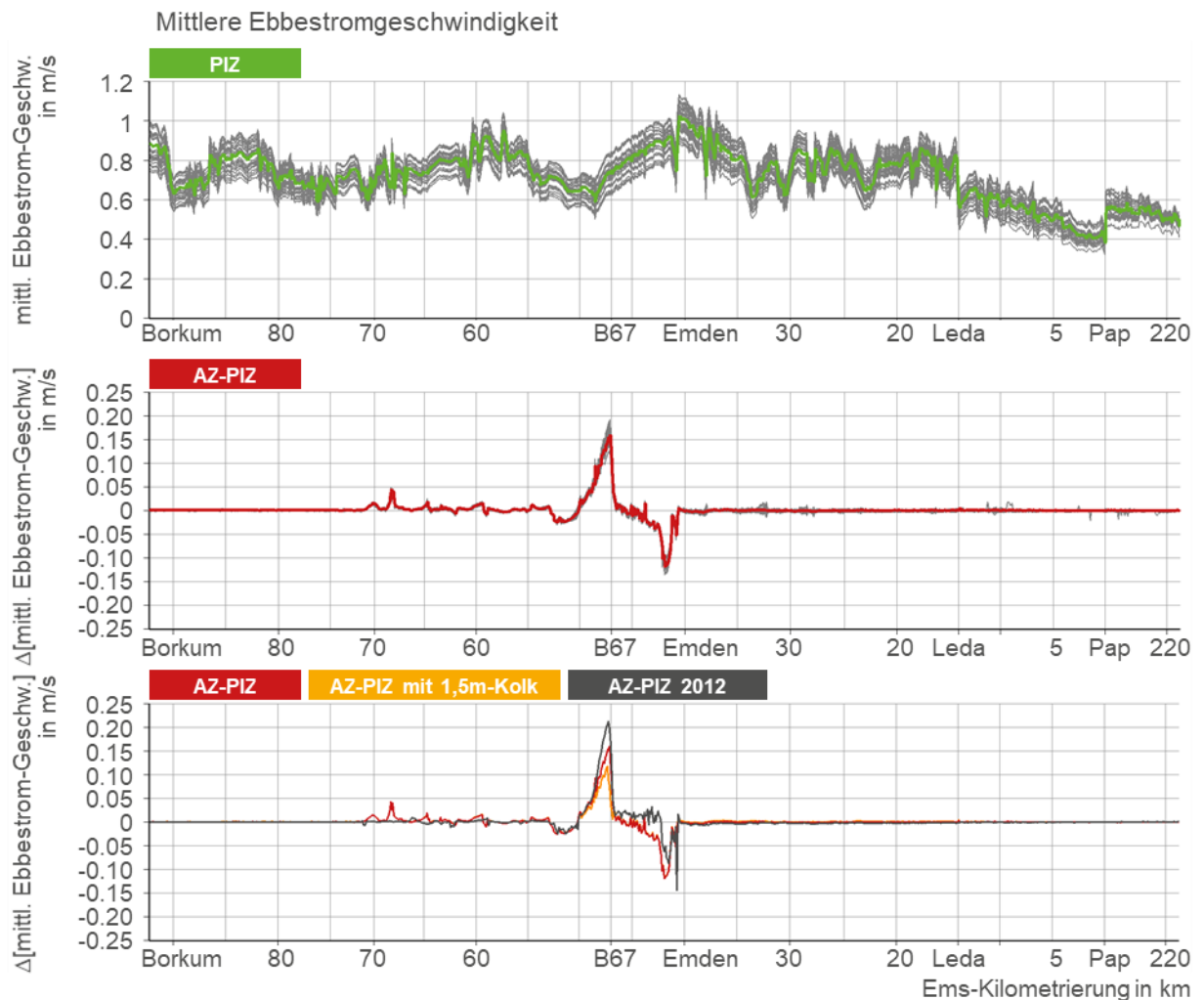


Bild 17: Tiefengemittelte mittlere Ebbestromgeschwindigkeit und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Mittlere Ebbestromgeschwindigkeit im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die über alle Tiden gemittelte mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

In der Außenems zwischen Ems-km 67 und 70 gibt es in den aktuellen Modellrechnungen einen zusätzlichen Bereich mit sichtbaren Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. In diesem Bereich waren im Gutachten-Modell von 2012 keine Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten zu sehen. Bild 18 zeigt, warum das aktuelle Modell Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten berechnet. Zur Herstellung der Ausbau-Solltiefen (in diesem Abschnitt ohne Eingriffshorizont) müssen einzelne Elemente des Gitters um mehr als einen halben Meter vertieft werden. Zu erkennen im Diagramm oben rechts an den blauen Kästchen innerhalb der Fahrrinne. Diese Glättung der Tiefen führt zu einer Fokussierung der Strömung auf den Bereich der Fahrrinne, zu erkennen

an den roten Strömungsfahnen, die in den Differenzen in der rechten Spalte sowohl für die Flutstrom- als auch für die Ebbestromgeschwindigkeiten gut zu erkennen sind. Rechts und links der Fahrrinne nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ganz geringfügig ab. Dazu der Hinweis, dass Differenzen dann nicht mehr dargestellt werden, wenn sie dem Betrag nach kleiner als 0,1 cm/s für die Tidekennwerte der Strömung bleiben.

Im Gutachten-Modell 2012 waren in diesem Bereich bereits im planerischen Ist-Zustand alle Gitterelemente ausreichend tief, so dass zur Herstellung des Ausbau-Zustandes keine Tiefenänderungen der Elemente mehr notwendig waren. Die Gitterelemente der Fahrrinne waren in diesem Abschnitt bereits tiefer als die Ausbau-Solltiefen. Ursache hierfür ist, dass das DGMW 2010 die Datengrundlage für den planerischen Zustand im Gutachten-Modell war (statt des DGMW 2015) und dass im Vergleich beider digitalen Geländemodelle innerhalb der Fahrrinne dieses Bereichs Sedimentation stattgefunden hat.

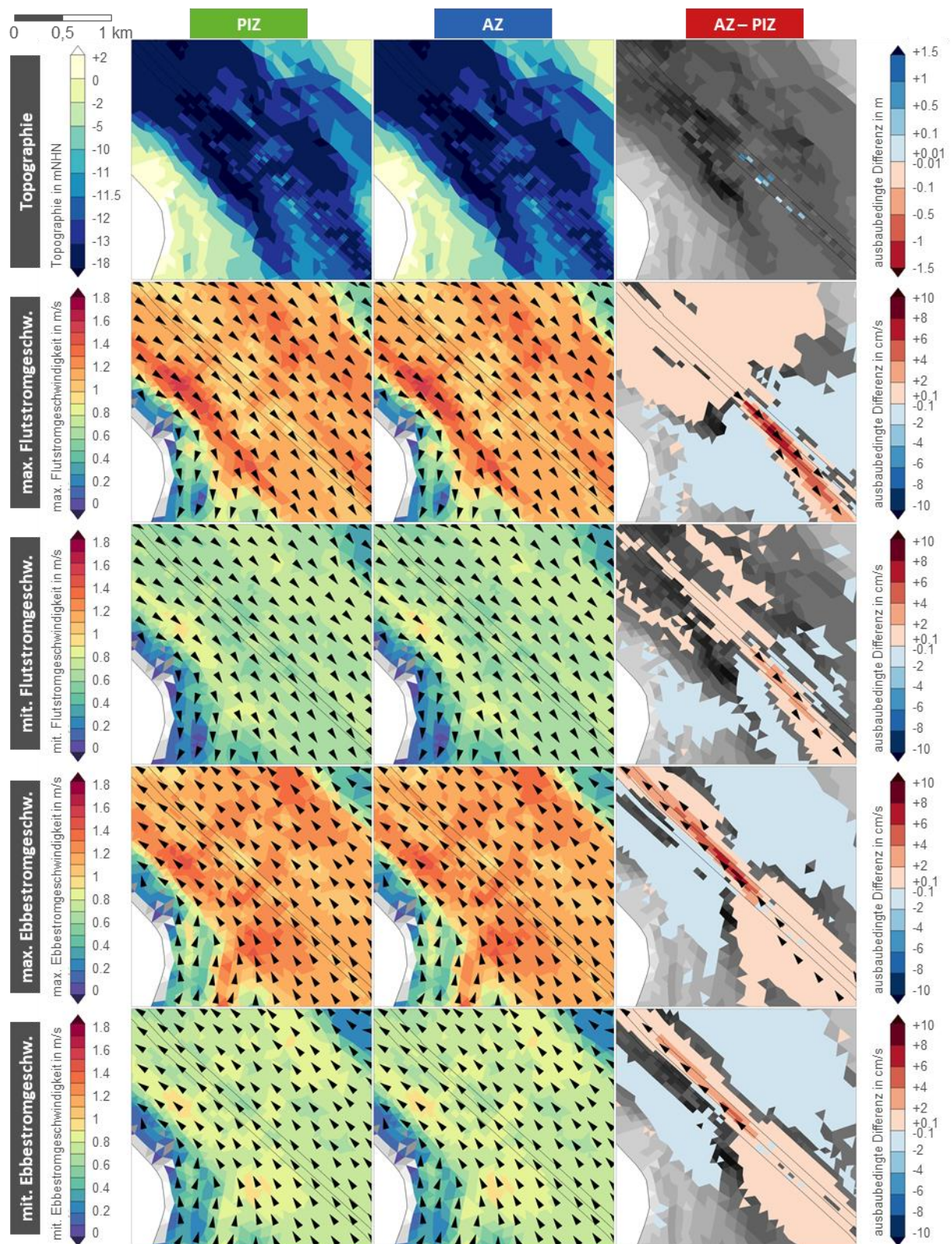


Bild 18: Draufsicht der Tidekennwerte der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten für einen Gebietsausschnitt von 2,5 mal 2,5 Quadratkilometern zwischen Ems-km 67 und 70. Von oben nach unten sind die Größen Topographie, maximale und mittlere Flutstrom- und maximale und mittlere Ebbestromgeschwindigkeit dargestellt. Von links nach rechts sind die Ergebnisse des planerischen Ist-Zustandes, des Ausbau-Zustandes und der Differenz Ausbau minus Plan-Ist-Zustand dargestellt.

In der Unterems und im DEK betragen die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten weniger als 2,5 cm/s. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen bestätigt diese Aussage. Die Änderungen beruhen hauptsächlich auf der Abnahme des Tidehubs, also einer Abnahme des Wasservolumens, welches mit dem Flutstrom nach Oberstrom und mit dem Ebbestrom Richtung Nordsee transportiert wird (auch als Tideprisma bezeichnet). Diese Tideprisma-Reduzierung reduziert auch die Tide-Asymmetrie in der Unterems. Hierzu sind stellvertretend die Verhältniswerte

- Ebbedauer zu Flutdauer (= Tidal Duration Asymmetry oder kurz TDA),
- maximale Flutstrom- zu maximale Ebbestromgeschwindigkeit (= Flow Velocity Asymmetry oder kurz FVA) und
- Stauwasserdauer² nach dem Flutstrom zur Stauwasserdauer nach dem Ebbestrom (= Flow Duration Asymmetry oder kurz FDA)

Fluss-abschnittsweise berechnet und in Tabelle 3 für die TDA, in Tabelle 4 für die FVA und in Tabelle 5 für die FDA zusammengefasst worden. Die Tabellen zeigen die Verhältniswerte für den planerischen Ist-Zustand und die ausbaubedingten Änderungen für den Ausbau-Zustand mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes. Es soll gezeigt werden, dass eine Kolkentwicklung keinen negativen Einfluss auf die Tide-Asymmetrie hat.

² Die Berechnung der Stauwasserdauer erfolgt mit Hilfe einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit: Es wird bestimmt, wie lange die kritische Strömungsgeschwindigkeit während einer Kenterphase unterschritten ist. Die kritische Strömungsgeschwindigkeit ist zu 0,2 m/s festgelegt worden.

Tabelle 3: Mittelung der Ebbe- und Flutdauern, sowie des Verhältniswertes Ebbedauer zu Flutdauer (Tidal Duration Asymmetry = TDA) für Abschnitte entlang der Fahrrinnenmitte der Unterems und des DEK. Für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) sind die Mittelwerte angegeben, für den Ausbau-Zustand mit 1,5m-Kolk sind die mittleren Änderungen bezogen auf den PIZ angegeben. Der Verhältniswert TDA zeigt die Tide-Asymmetrie bezüglich der Ebbe- und Flutdauern an. Werte Größer als 1 bedeuten, dass die Ebbedauer größer als die Flutdauer ist. Mit anderen Worten, sie zeigen Flutdominanz an, denn mit langer Ebbedauer sind die Ebbestromgeschwindigkeiten klein, die Flutdauer kurz und die Flutstromgeschwindigkeiten groß. Die für alle Abschnitte erkennbare ausbaubedingte Abnahme des Verhältniswertes TDA zeigt stromauf des Emssperrwerks eine Reduzierung der Flutdominanz und zwischen Emden und dem Emssperrwerk eine Zunahme der Ebbedominanz an.

TDA	PIZ			AZ-PIZ mit 1,5m-Kolk		
	Ebbe-dauer	Flut-dauer	TDA	ΔEbbe-Dauer	ΔFlut-dauer	ΔTDA
Abschnitt	min	min	E:F	min	min	E:F
EMD bis SPW km 40,6 bis 32,3	370	374	0,99	-0,9	0,8	-0,004
SPW bis Leda km 32,2 - 14,3	402	342	1,18	-0,6	0,6	-0,004
Leda bis PAP km 14,2 - 0,0	447	297	1,51	-1,0	1,0	-0,008
DEK-km 225,8 bis 220,0	478	266	1,80	-0,9	0,9	-0,010

Die Tabelle 3 zur TDA zeigt für den planerischen Ist-Zustand, dass die TDA von Emden Richtung DEK kontinuierlich ansteigt. Der Abschnitt Emden bis Emssperrwerk hat im Mittel eine geringe Ebbedominanz, die TDA beträgt 0,99 und zeigt nahezu gleich lange Ebbe- und Flutdauern an. Weiter Richtung Oberstrom zeigt die TDA eine Flutdominanz an und steigt bis auf 1,80 im DEK-Abschnitt an. In diesem Abschnitt teilt sich die Tidedauer zu knapp 2/3 (64 %) auf die Ebbedauer und nur zu gut 1/3 (36 %) auf die Flutdauer auf. Für alle Abschnitte ist eine ausbaubedingte Abnahme der TDA erkennbar. Das bedeutet, dass im Abschnitt Emden bis Emssperrwerk die Ebbedominanz ausbaubedingt ansteigt und in allen Abschnitten stromauf des Emssperrwerks die Flutdominanz ausbaubedingt abnimmt.

Tabelle 4: Mittelung der maximalen Flutstrom- und Ebbestromgeschwindigkeiten, sowie des Verhältniswertes der max. Flutstrom- zu Ebbestromgeschwindigkeiten (Flow Velocity Asymmetry = FVA) für Abschnitte entlang der Fahrrinnenmitte der Unterems und des DEK. Für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) sind die Mittelwerte angegeben, für den Ausbau-Zustand mit 1,5m-Kolk sind die mittleren Änderungen bezogen auf den PIZ angegeben. Der Verhältniswert FVA zeigt die Tide-Asymmetrie bezüglich der max. Flutstrom- und Ebbestromgeschwindigkeiten an. Werte Größer als 1 bedeuten, dass die max. Flutstromgeschwindigkeiten größer als die max. Ebbestromgeschwindigkeiten sind. Mit anderen Worten, sie zeigen Flutstromdominanz an. Die für alle Abschnitte erkennbare ausbaubedingte Abnahme des Verhältniswertes FVA zeigt eine Reduzierung der Flutstromdominanz an.

FVA	PIZ			AZ-PIZ mit 1,5m-Kolk		
	Max. Strömung		FVA	ΔMax. Strömung		ΔFVA
	Flut- strom	Ebbe- strom	F:E	Flut- strom	Ebbe- strom	F:E
Abschnitt	cm/s	cm/s	-	cm/s	cm/s	-
EMD bis SPW km 40,6 bis 32,3	129	116	1,12	0,0	0,3	-0,004
SPW bis Leda km 32,2 - 14,3	125	105	1,19	0,0	0,1	-0,002
Leda bis PAP km 14,2 - 0,0	120	81	1,48	-0,1	0,1	-0,004
DEK-km 225,8 bis 220,0	117	78	1,51	-0,1	0,1	-0,003

Die Tabelle 4 zur FVA zeigt für den planerischen Ist-Zustand, dass alle Abschnitte Flutstromdominanz aufweisen (FVA größer als 1) und dass die Flutstromdominanz Richtung DEK kontinuierlich zunimmt. Für alle Abschnitte ist eine ausbaubedingte Abnahme der FVA erkennbar. Das bedeutet, dass in allen Abschnitten die Flutstromdominanz ausbaubedingt abnimmt.

Die Tabelle 5 zur FDA zeigt für den planerischen Ist-Zustand, dass alle Abschnitte Flutstromdominanz aufweisen (FDA größer als 1) und dass die Flutstromdominanz Richtung DEK kontinuierlich zunimmt. Mit einer Ausnahme ist für alle Abschnitte eine ausbaubedingte Abnahme der FDA erkennbar. Das bedeutet, dass in diesen Abschnitten die Flutstromdominanz ausbaubedingt abnimmt. Die Ausnahme ist der Abschnitt Emden bis Emssperrwerk im Ausbau-Zustand ohne Kolk. Hier bleibt die FDA ausbaubedingt unverändert.

Tabelle 5: Mittelung der Stauwasserdauern zur Kenterung nach Flut- und Ebbestrom, sowie des Verhältniswertes der Stauwasserdauern Kenterung Flutstrom zu Ebbestrom (Flow Duration Asymmetry = FDA) für Abschnitte entlang der Fahrrinnenmitte der Unterems und des DEK. Für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) sind die Mittelwerte angegeben, für den Ausbau-Zustand mit 1,5m-Kolk sind die mittleren Änderungen bezogen auf den PIZ angegeben. Der Verhältniswert FDA zeigt die Tide-Asymmetrie bezüglich der Stauwasserdauern nach Flut- und nach Ebbestrom an. Werte Größer als 1 bedeuten, dass die Stauwasserdauern nach dem Flutstrom größer als die Stauwasserdauern nach dem Ebbestrom sind. Mit anderen Worten, sie zeigen Flutstromdominanz an, denn eine lange Staudauer nach dem Flutstrom bietet ein hohes Sedimentations-Potential für die mit dem Flutstrom nach stromauf transportierten Schwebstoffe. Die ausbaubedingte Abnahme des Verhältniswertes FDA zeigt eine Reduzierung der Flutstromdominanz an.

FDA	PIZ		FDA	AZ-PIZ mit 1,5m-Kolk		
	Staudauer nach Kenterung			ΔStaudauer nach Kenterung		
	Flut	Ebbe	F:E	Flut	Ebbe	F:E
Abschnitt	min	min	-	min	min	-
EMD bis SPW km 40,6 bis 32,3	53	14	4	0,0	0,2	-0,1
SPW bis Leda km 32,2 - 14,3	72	10	8	-0,1	0,2	-0,2
Leda bis PAP km 14,2 - 0,0	123	6	22	0,2	0,3	-1,0
DEK-km 225,8 bis 220,0	139	2	68	0,2	0,1	-4,7

Die ausbaubedingten Änderungen der Tide-Asymmetrie in der Unterems und im DEK zeigen eine Zunahme der Ebbedominanz oder eine Abnahme der Flut- oder Flutstromdominanz an. Damit ist gezeigt, dass der geplante Ausbau in der Unterems und im DEK zu einer Abnahme der Tide-Asymmetrie führt. Diese Abnahme der Tide-Asymmetrie ist jedoch sehr gering.

5.4 Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf die Salzverteilung

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, lassen sich die ausbaubedingten Änderungen des Salzgehalts auf zwei Effekte zurückführen: Erstens führt eine Vertiefung zu einer Zunahme der baroklinen Kräfte, denn die baroklinen Kräfte nehmen bei gegebenem horizontalen Dichtegradienten linear mit der Tiefe zu. Daraus folgt, dass mit ausbaubedingt zunehmender Wassertiefe auch die gravitative Zirkulation zunimmt. Die Salzintrusion gelangt weiter nach stromauf. Zweitens führen ausbaubedingte Strömungsänderungen zu einer Veränderung der Advektion der Salzmasse mit der Strömung:

- Eine abschnittsweise Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit (wie zum Beispiel stromauf der Querschnittseinengung) führt zu einer Zunahme des maximalen und mittleren Salzgehalts stromauf des Abschnitts, weil die Flutstrom-Transportwege weiter Richtung stromauf verlängert werden, die stromab oder im Abschnitt des Ausbaus beginnen.

- Eine abschnittsweise Abnahme der Flutstromgeschwindigkeit (wie zum Beispiel in der Wendestelle) führt zu einer Abnahme des maximalen und mittleren Salzgehalts stromauf des Abschnitts, weil die Flutstrom-Transportwege weiter Richtung stromauf verkürzt werden, die stromab oder im Abschnitt des Ausbaus beginnen.
- Eine abschnittsweise Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeit (wie zum Beispiel stromab der Querschnittseinengung) führt zu einer Abnahme des minimalen und mittleren Salzgehalts stromab des Abschnitts, weil die Ebbestrom-Transportwege weiter Richtung stromab verlängert werden, die stromauf oder im Abschnitt des Ausbaus beginnen.
- Eine abschnittsweise Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit (wie zum Beispiel in der Wendestelle) führt zu einer Zunahme des minimalen und mittleren Salzgehalts, weil die Ebbestrom-Transportwege weiter Richtung stromab verkürzt werden, die stromauf oder im Abschnitt des Ausbaus beginnen.

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 19 für den minimalen, Bild 20 für den maximalen und Bild 21 für den mittleren Salzgehalt) zeigt, dass die genannten Prozesse in beiden Modellen zu ähnlichen ausbaubedingten Änderungen führen. Die größten Änderungen sind im minimalen Salzgehalt im Emden Fahrwasser zu sehen. Der minimale Salzgehalt nimmt zu, hauptsächlich weil die Ebbestrom-Transportwege durch die Wendestelle verkürzt sind, aber auch durch die Zunahme der baroklinen Kräfte. Dadurch wird der Salzgehaltsgradient und die Zone der maximalen Salzgehaltsvariation nach Oberstrom verschoben. Die Salzmasse befindet sich im Mittel weiter Oberstrom.

Weitere ausbaubedingte Änderungen:

- Der maximale Salzgehalt nimmt in der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone ausbaubedingt zu. Hauptsächlich, weil die Advektion der Salzmasse mit dem Flutstrom im Bereich der Querschnittseinengung zunimmt, weil die Salzmasse im Mittel weiter nach Oberstrom verschoben ist und durch die Zunahme der baroklinen Kräfte.
- Der maximale Salzgehalt nimmt seewärts von Pogum und im Emden Fahrwasser ausbaubedingt ab. Hauptsächlich, weil die Advektion der Salzmasse mit dem Flutstrom im Bereich der Wendestelle abnimmt.
- Der mittlere Salzgehalt nimmt im Emden Fahrwasser und der Unterems bis zur oberstromseitigen Grenze der Brackwasserzone ausbaubedingt zu, weil die Salzmasse im Mittel nach Oberstrom verschoben ist.

Insgesamt fallen die ausbaubedingten Änderungen des Salzgehalts in der Unterems in den aktuellen Modellrechnungen dem Betrag nach etwas geringer aus als im Gutachten 2012 gezeigt. Ursache ist, dass der advective Transport des Salzes durch die Strömung in zwei Bereichen der Ausbaustrecke weniger zunimmt, bzw. stärker abnimmt, als im Gutachten 2012 genannt:

1. Im Bereich der Querschnittseinengung sind die Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeit geringer als 2012 gezeigt, entsprechend fällt die Zunahme der Advektion der Salzmasse mit der Strömung ausbaubedingt geringer aus. Die Zunahme der Salzintrusion muss entsprechend geringer ausfallen als im Gutachten 2012 gezeigt.

2. Im Bereich der Wendestelle sind die Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeit größer als 2012 gezeigt, entsprechend fällt die Abnahme der Advektion der Salzmasse mit der Strömung ausbaubedingt größer aus. Die Zunahme der Salzintrusion muss entsprechend geringer ausfallen als im Gutachten 2012 gezeigt.

Der Aspekt der Zunahme der gravitativen Zirkulation durch das aktuell größere Baggervolumen und damit verbunden die ausbaubedingt größeren Wassertiefen in der Ausbaustrecke der Fahrinne fällt hier weniger ins Gewicht, ansonsten hätte insbesondere die Zunahme des maximalen Salzgehalts in der Unterems hier größer ausfallen müssen als im Gutachten 2012.

Der Vergleich der mittleren Wassertiefen zwischen den digitalen Geländemodellen 2010 und 2015 (siehe Tabelle 1 in Kapitel 3.3) zeigt, dass der Abschnitt Emden bis Emssperrwerk 9 cm flacher und der anschließende Abschnitt Emssperrwerk bis Ledamündung 6 cm flacher ist als 2010. Das bedeutet, dass die baroklinen Kräfte in der Unterems zwischen Emden und Ledamündung etwas geringer sind als im Gutachten-Modell. Der barotrope Druckanteil durch den Oberwasserzufluss der Ems ist dagegen angewachsen, denn der unveränderte Abfluss der Ems ($44 \text{ m}^3/\text{s}$) führt in einem kleineren Querschnitt (wegen der geringeren Wassertiefen) zu einer Zunahme des Wasserspiegelgradienten und damit zu einer Zunahme der barotropen Kräfte. Im Resultat reicht die Salzintrusion im aktuellen Modell etwas weniger weit nach Oberstrom als im Gutachten-Modell von 2012.

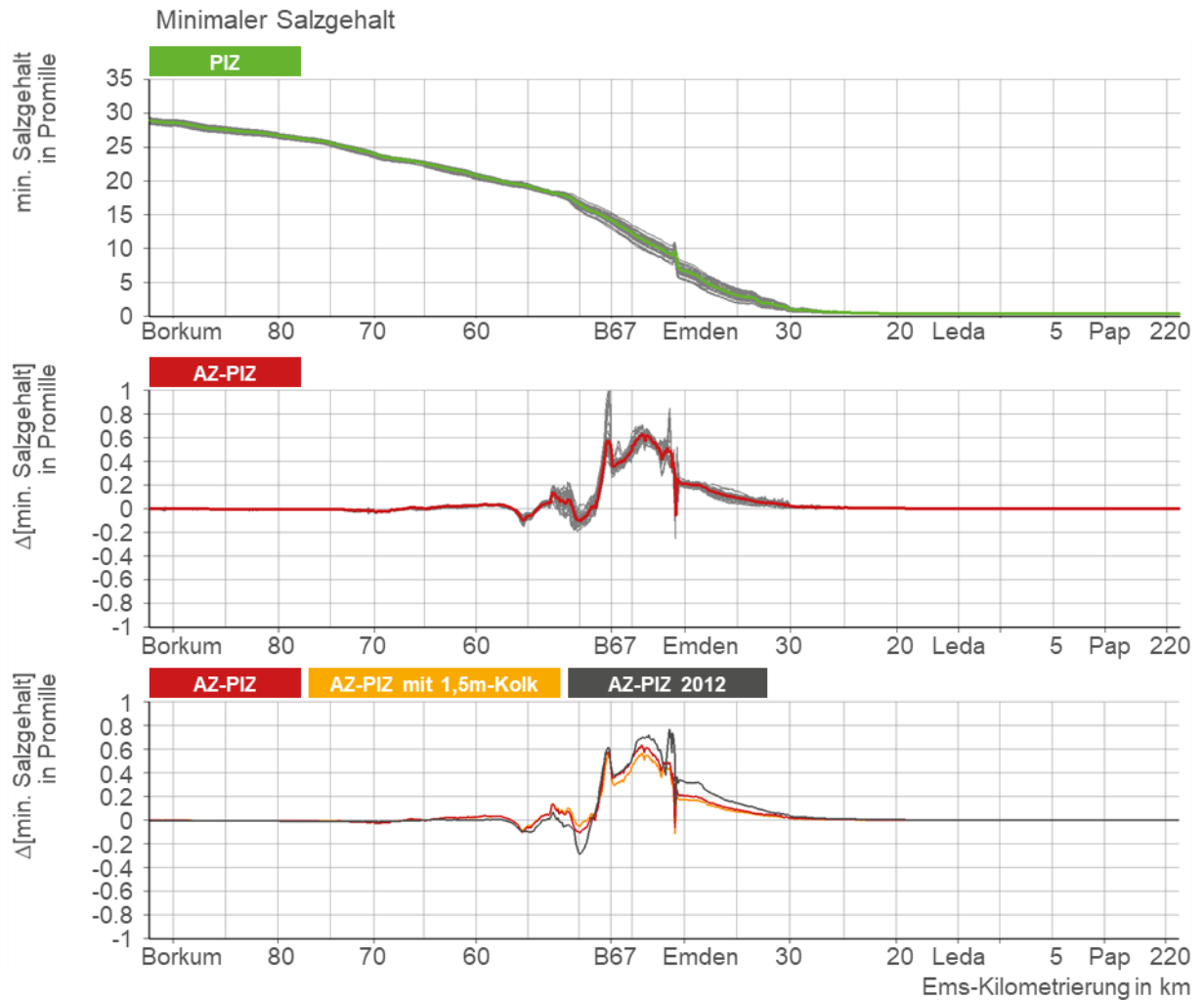


Bild 19: Tiefengemittelter minimaler Salzgehalt und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Minimaler Salzgehalt im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte minimale Salzgehalt (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

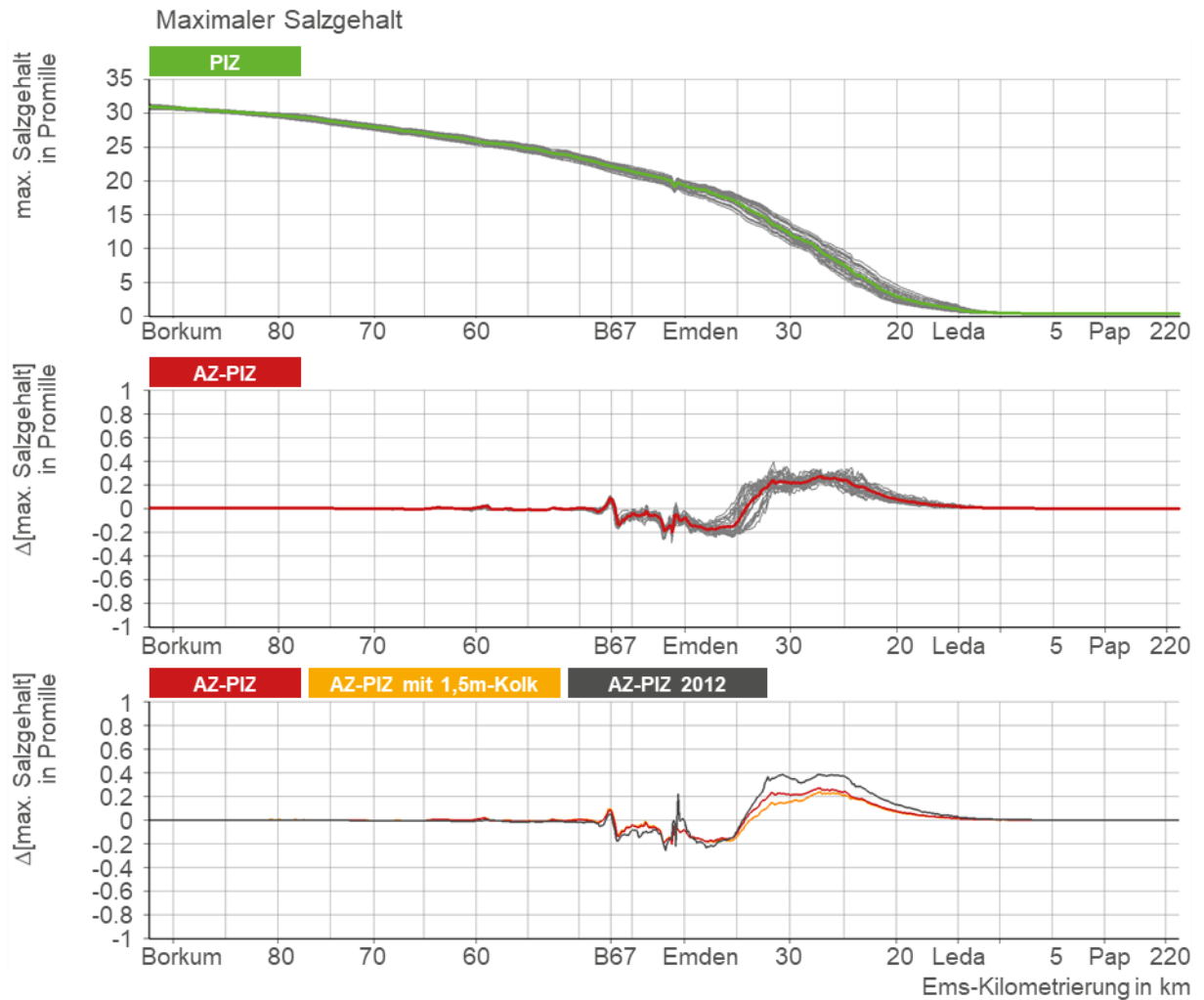


Bild 20: Tiefengemittelter maximaler Salzgehalt und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Maximaler Salzgehalt im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte maximale Salzgehalt (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

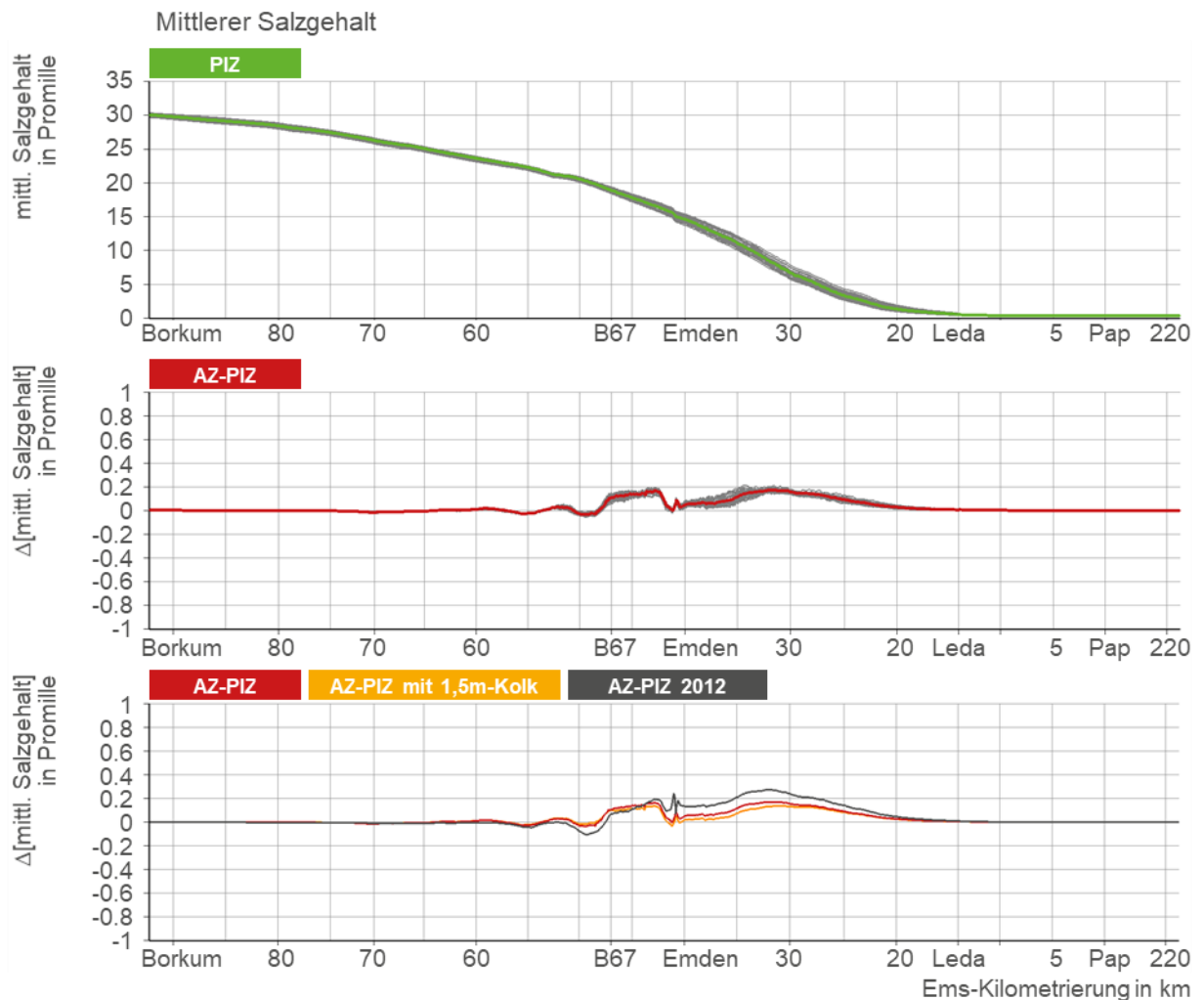


Bild 21: Tiefengemittelter mittlerer Salzgehalt und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Mittlerer Salzgehalt im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte mittlere Salzgehalt (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

Die ausbaubedingte Zunahme des minimalen, mittleren und maximalen Salzgehalts in der Unterems lässt sich auch als eine Verlagerung der Brackwasserzone nach Oberstrom deuten. Die maximale Ausdehnung in Richtung Oberstrom erreicht die Brackwasserzone etwa zum Zeitpunkt der Flutstromkenterung, wenn auch der Salzgehalt innerhalb einer Tide für einen beliebigen Ort das Maximum annimmt. Deshalb werden die Lage und die ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone auf der Basis des maximalen Salzgehalts bestimmt. Wie weit die Brackwasserzone nach Oberstrom verlagert wird, ist abhängig von der Zunahme des maximalen Salzgehalts. Je größer die Zunahme, desto weiter nach Oberstrom verlagert sich die Brackwasserzone. Darüber hinaus ist die Verlagerung auch abhängig vom horizontalen Gradienten des Salzgehalts:

Je größer der Gradient ist (angegeben z.B. als Salzgehaltsänderung in ‰ pro km in Längsrichtung), desto kürzer sind die Abstände zwischen zwei Isohalinen (siehe Bild 22). Desto kürzer ist auch die horizontale Verlagerung einer Isohaline bei gegebener Zunahme des Salzgehalts. Die Verlagerung der Brackwasserzone ist also dann groß, wenn die Zunahme des Salzgehalts groß ist und wenn der horizontale Salzgehaltsgradient klein ist.

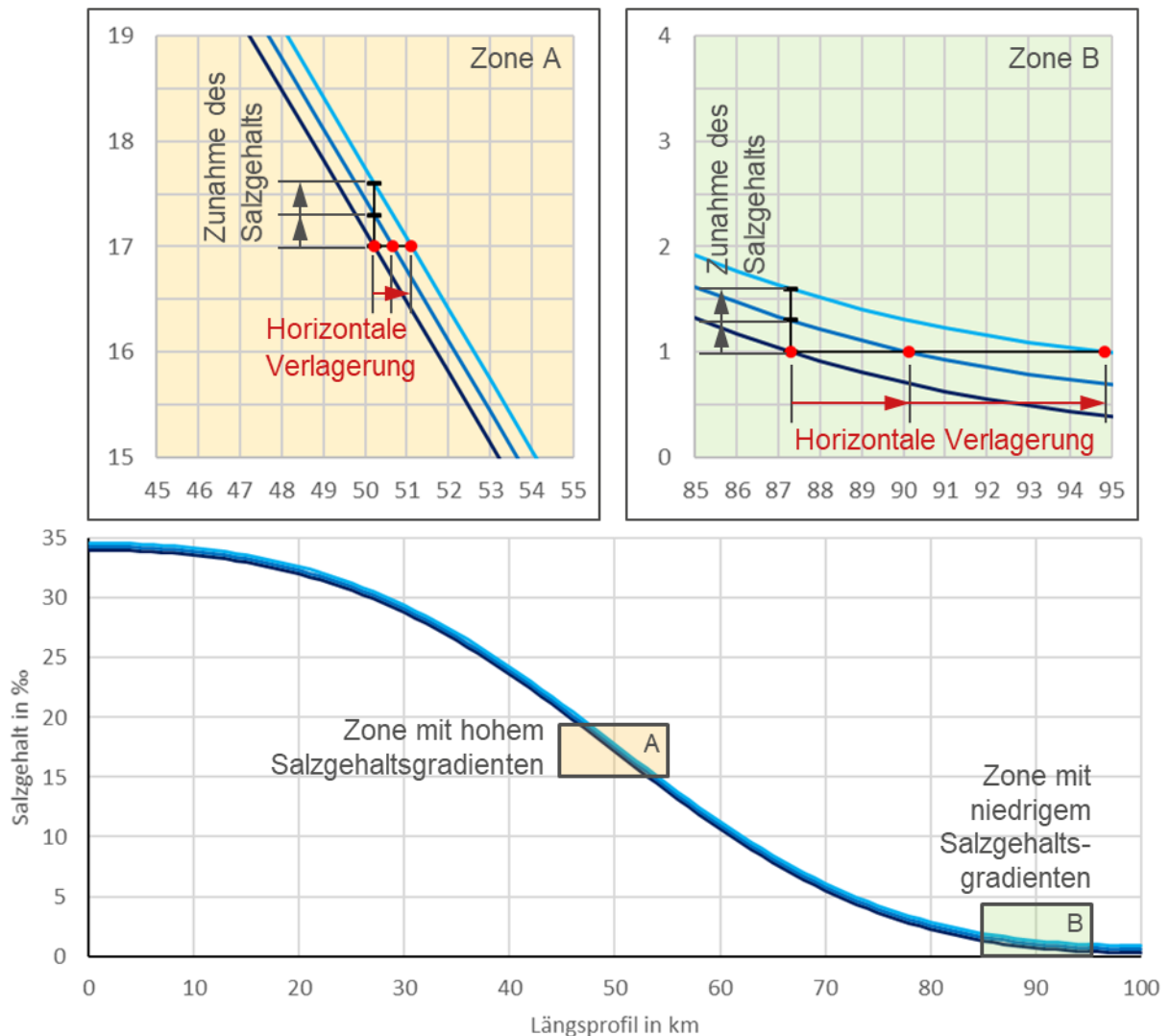


Bild 22: *Prinzipiskizze zur Abhängigkeit der horizontalen Verlagerung der Brackwasserzone von der Salzgehaltszunahme und dem horizontalen Salzgehaltsgradienten. Unten ist eine typische Salzgehaltsverteilung längs eines Ästuars dargestellt. Die Salzgehaltswerte sind nahe des Meeres hoch (links) und nehmen in Richtung Oberstrom (rechts) kontinuierlich ab. Die Abnahmerate, also das Gefälle der Kurve, ist der horizontale Salzgehaltsgradient und ist nicht konstant, sondern weist in der Mitte des Ästuars dem Betrag nach ein Maximum auf. Zusätzlich wird auf zwei Ausschnitte fokussiert (Zone A und B). Zone A (oben links) weist einen hohen horizontalen Salzgehaltsgradienten auf. Eine über die gesamte Länge des Ästuars als konstant angenommene Zunahme des Salzgehalts (hier zweimal je 0,3 ‰) führt zu einer beispielhaften horizontalen Verlagerung der 17 ‰-Isohaline von jeweils etwa einem halben Kilometer. Im Vergleich dazu führt in Zone B (oben rechts) mit niedrigem horizontalen Salzgehaltsgradienten am Beispiel der 1 ‰-Isohaline die gleiche Zunahme des Salzgehalts zu einer vergleichsweise hohen horizontalen Verlagerung von knapp 3 km und knapp 5 km.*

Die Umrechnung des maximalen Salzgehalts in eine horizontale Lage der Brackwasserzone wird ausführlich in Kapitel 8.5 des Gutachtens zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW 2012) beschrieben, ist aber in einem Punkt geändert worden: Die im Gutachten 2012 durchgeführten Berechnungen zur Lage der Brackwasserzone sind auf Basis von Daten auf Querprofilen durchgeführt worden, wobei die Querprofile in der Unterems einen Abstand von 500 m haben. Die aktuelle Umrechnung des maximalen Salzgehalts erfolgt auf Basis aller Modelldaten zwischen zwei Querprofilen. Beispiel: Alle Daten zwischen Ems-km 40 und 40,5 werden mit der Wassertiefe gewichtet gemittelt und dann dem Ems-km 40,25 zugeordnet. Diese Analyse stellt einen allgemeingültigeren Ansatz zur Umrechnung des maximalen Salzgehalts in eine horizontale Lage der Brackwasserzone dar, denn es werden alle Daten zwischen zwei Querprofilen berücksichtigt. Der Unterschied im Endergebnis sollte dennoch klein sein, weil der maximale Salzgehalt von den hohen Werten in der Nordsee zu den niedrigen Werten im Süßwasser einen stetigen Verlauf aufweist.

Tabelle 6 zeigt die ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone für die Isohalinen 3 ‰ (Übergang oligohalin-mesohalin), 18 ‰ (Übergang mesohalin-polyhalin) und 30 ‰ (Übergang polyhalin-euhalin), jeweils für den Ausbau-Zustand ohne Berücksichtigung eines Kolks. Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes ist die ausbaubedingte Zunahme des maximalen Salzgehalts geringer, entsprechend auch die ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone. Deshalb wird hier der Kolk im Sinne einer Maximal-Betrachtung bezüglich der Verlagerung nicht berücksichtigt. Zum Vergleich werden hier auch die Zahlen aus BAW (2012) für das Szenario M1 (häufigster Oberwasserzufluss) wiederholt. Der Vergleich für den häufigsten Abfluss zeigt, dass die gutachterlichen Aussagen zur Verlagerung der drei Isohalinen weiterhin gültig sind oder wie folgt präzisiert werden können:

- Die 3 ‰-Isohaline verschiebt sich ausbaubedingt weniger als 500 m nach Oberstrom,
- die 18 ‰-Isohaline verschiebt sich bei häufigstem Abfluss ausbaubedingt um weniger als 500 m nach Unterstrom und
- die 30 ‰-Isohaline verschiebt sich ausbaubedingt weniger als 100 m.

Tabelle 6: Lage der Brackwasserzone und ausbaubedingte horizontale Verlagerung der Brackwasserzone für die Isohalinen 3 ‰ (Übergang oligohalin-mesohalin), 18 ‰ (Übergang mesohalin-polyhalin) und 30 ‰ (Übergang polyhalin-euhalin) auf der Basis des maximalen Salzgehalts. Die Vergleichsdaten stammen aus Tabelle 8 (BAW 2012) für Szenario M1 (häufigster Oberwasserzufluss).

	Lage der Isohaline im PIZ in Ems-km		Lage der Isohaline im AZ in Ems-km		Ausbaubedingte horizontale Verlagerung AZ minus PIZ in m	
	Gutachten	Aktuell	Gutachten	Aktuell	Gutachten	Aktuell
3 ‰	18,30	20,16	18,20	20,02	-100	-140
18 ‰	35,35	37,51	35,45	37,86	+100	+350
30 ‰	81,00	84,58	81,03	84,54	+30	-40

Diese Analyse wird zusätzlich für alle ganzzahligen Isohalinen zwischen 1 ‰ und 30 ‰ durchgeführt, so dass die Darstellung der ausbaubedingten horizontalen Verlagerung der Brackwasserzone auch grafisch über der Ems-Kilometrierung erfolgen kann (siehe Bild 23). Zum Vergleich wird auch hier die Kurve aus BAW (2012) für das Szenario M1 eingeblendet.

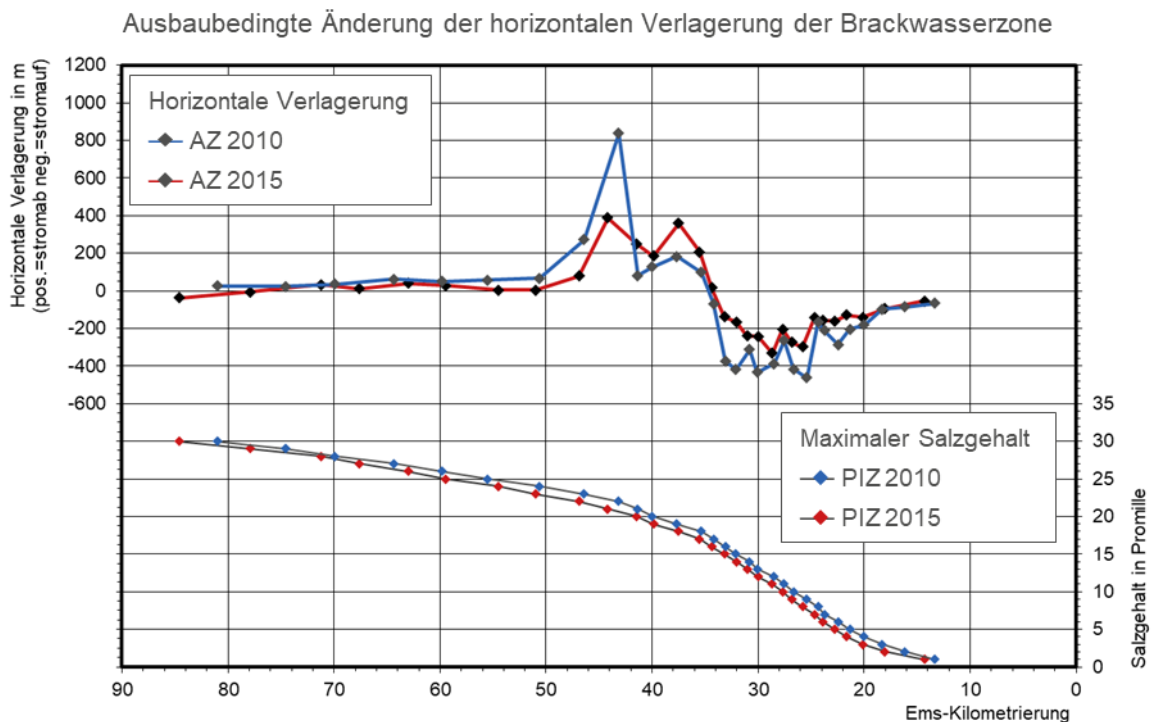


Bild 23: Längsschnitt der ausbaubedingten horizontalen Verlagerung der Brackwasserzone (obere Hälfte) und des abschnittsweise gemittelten maximalen Salzgehalts im PIZ (untere Hälfte des Diagramms). In Rot für das aktuelle Modell und zum Vergleich in Blau für das Gutachten-Modell von 2012. Die horizontale Verlagerung der Brackwasserzone ist für die Isohalinen 1 ‰ bis 30 ‰ mit einer Schrittweite von 1 ‰ berechnet worden.

Der Vergleich zeigt, dass die im Gutachten vorgenommene Aufteilung in drei Bereiche weiterhin sinnvoll ist:

1. Seewärts von Knock: Die Brackwasserzone verschiebt sich um weniger als 100 m.
2. Zwischen Knock und Pogum: Die Brackwasserzone verschiebt sich um bis zu 1 km in Richtung See. 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.

Die aktuellen Berechnungen zur ausbaubedingten Verlagerung der Brackwasserzone bestätigen die Prognosen des Gutachtens von 2012, mit einer Ausnahme: Seewärts von Knock bleibt es bei kleinen Verlagerungen der Brackwasserzone (kleiner als 100 m). Die Verlagerung kann aber sowohl nach Unterstrom als auch nach Oberstrom erfolgen (siehe in Bild 23 oben die Stromauf-Verlagerung seewärts Ems-km 75).

5.5 Vergleich der Wirkung des geplanten Ausbaus auf den Schwebstoff-Haushalt

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, nehmen der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt in der Unterems sowie im Emdener Fahrwasser bis zur Querschnittseinengung 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. Die Wendestelle allein führt aber nicht zu einer Abnahme der Schwebstoffe in der gesamten Unterems. Ohne die Berücksichtigung der Querschnittseinengung steigt der Schwebstoffgehalt in der oberen Unterems 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 (siehe Bild 51 in BAW 2012). 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.

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 24 und Bild 25 für den maximalen und mittleren Schwebstoffgehalt) zeigt, dass die Grundaussage aus 2012, wonach der Schwebstoffgehalt in der Unterems sowie im Emdener Fahrwasser bis zur Querschnittseinengung abnimmt, weiterhin gültig bleibt. Die Abnahmen im Gehalt sind aktuell allerdings geringer als 2012 prognostiziert. Dies hat zwei Gründe: Erstens ist das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes größer als 2012 (2,7 Mio m³ im Vergleich zu 1,8 Mio m³). Damit würde ohne Querschnittseinengung das Tideniedrigwasser weiter absinken, als 2012 in Bild 31 (mittleres Diagramm) dargestellt, weil der Reibungseinfluss auf die Dissipation der Tideenergie weiter abnimmt und damit im Vergleich mehr Tideenergie als mechanische Energie zur Verfügung steht. Die Tide-Asymmetrie nimmt stärker zu und führt letztlich zu einer größeren Zunahme der Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport. Zweitens ist durch die verbesserte Abbildung der Höhenlage (siehe Kapitel 3.2) der zu verlängernden Buhnen die Wirkung der Buhnenverlängerung reduziert.

Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes ist die positive Wirkung der Querschnittseinengung auf die Hydrodynamik in der Unterems (Anhebung des Tideniedrigwassers, Reduktion des Energieeintrags, der Tide-Asymmetrie und der Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport) weiter vermindert. Als Folge ist die ausbaubedingte Abnahme des Schwebstoffgehalts in Teilen der Unterems aufgehoben und damit genauso hoch wie im planerischen Vergleichszustand. Die Analyse des advektiven Transports von Schwebstoffen mit der Strömung zeigt, dass am seeseitigen Eingang zur Unterems bei Ems-km 35 der residuelle Schwebstofftransport ausbaubedingt abnimmt (siehe Bild 28). Es gelangen also ausbaubedingt weniger Schwebstoffe von See in die Unterems. Deshalb sind Umlagerungen innerhalb der Unterems die Ursache für die Aufhebung der Schwebstoffgehaltsabnahmen in Teilen der Unterems.

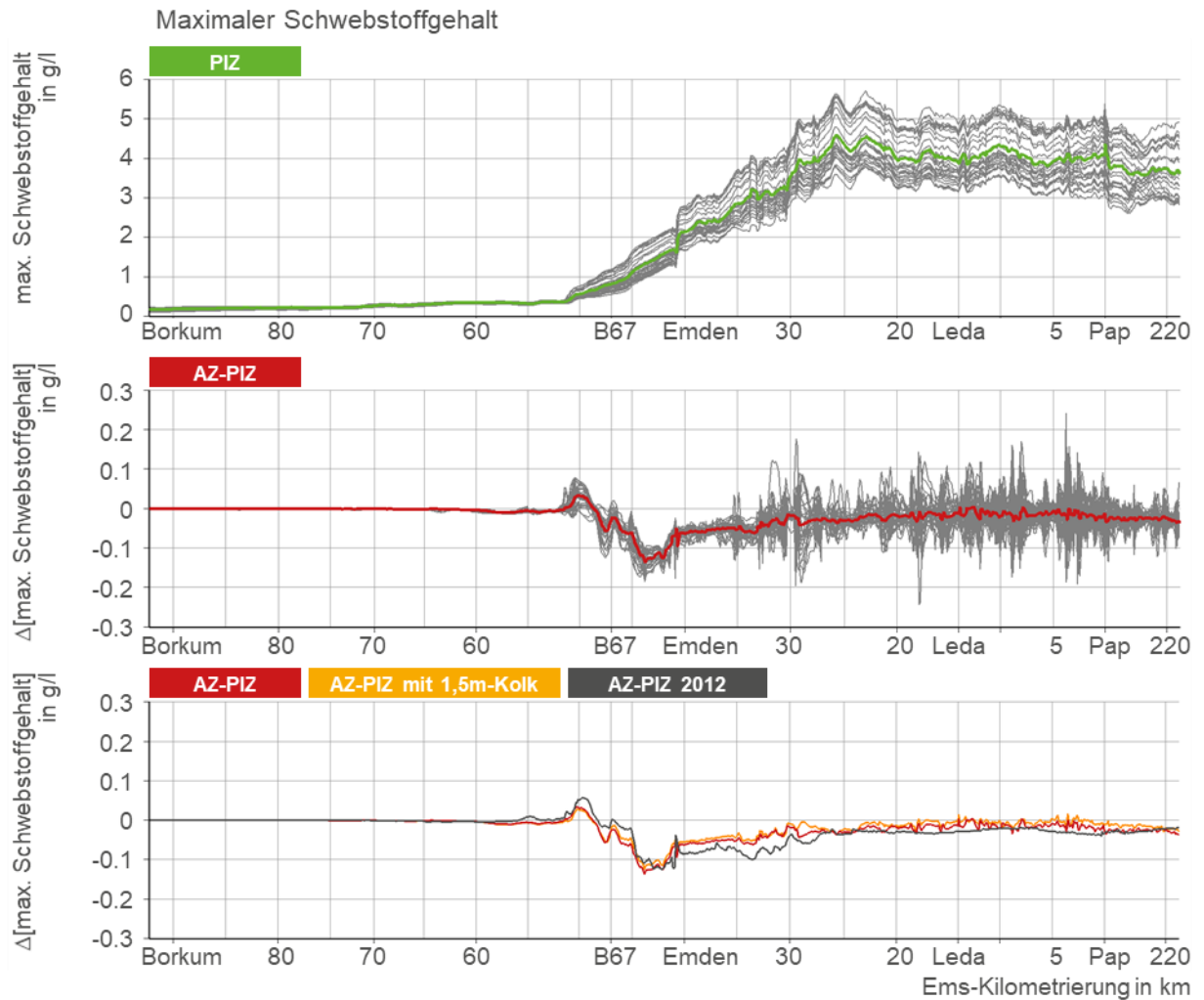


Bild 24: Tiefengemittelter maximaler Schwebstoffgehalt und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Maximaler Schwebstoffgehalt im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeit-
 raums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte maximale Schwebstoffgehalt
 (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-
 Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Aus-
 bau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für
 den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

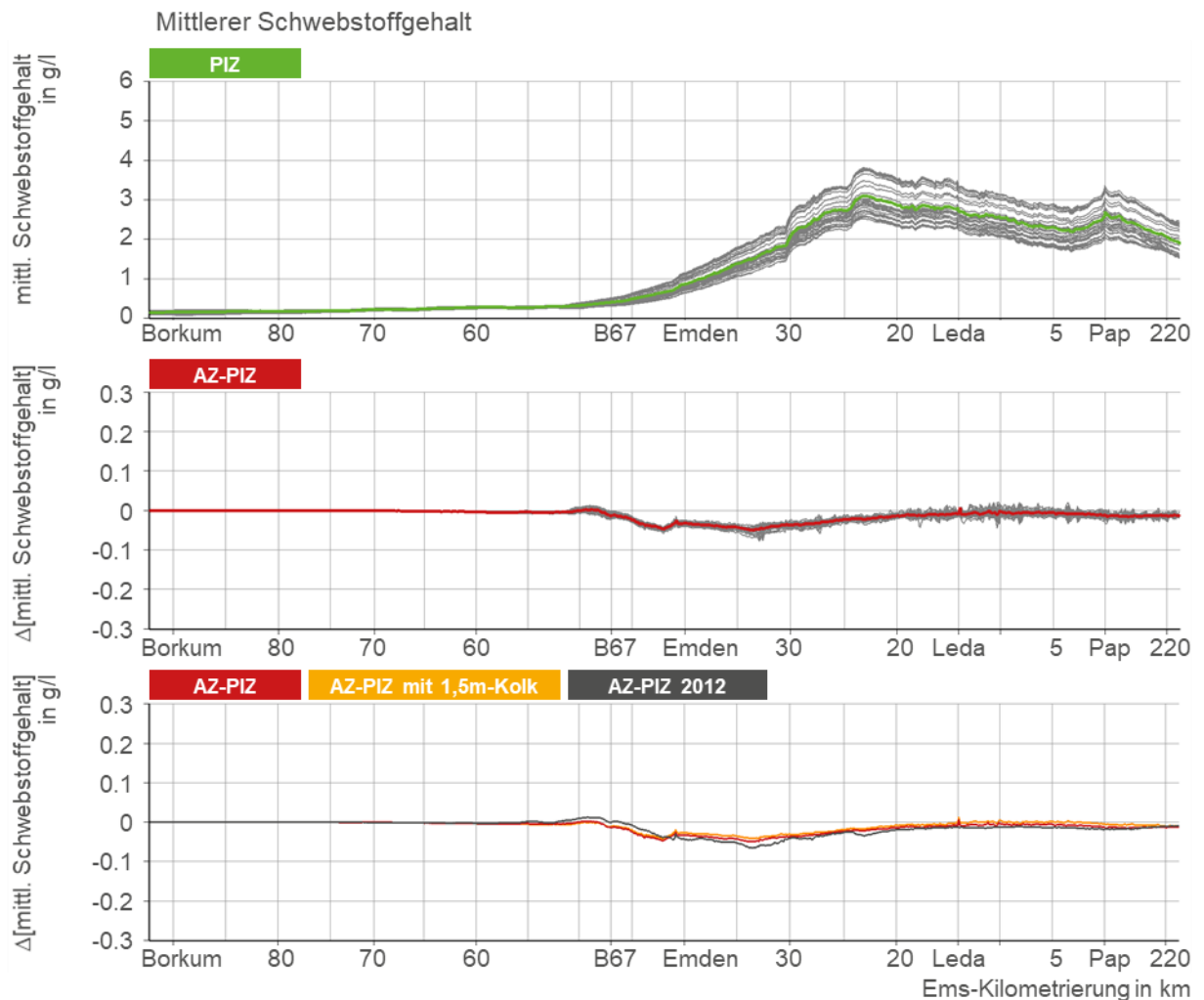


Bild 25: Tiefengemittelter mittlerer Schwebstoffgehalt und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt in Fahrrinnenmitte zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Mittlerer Schwebstoffgehalt im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte mittlere Schwebstoffgehalt (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, nimmt sowohl der advective Transport von Schwebstoffen mit dem Flutstrom als auch mit dem Ebbstrom in der Außen- und Unterems ab. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 26 für den advectiven Schwebstofftransport mit dem Flutstrom und Bild 27 für den advectiven Schwebstofftransport mit dem Ebbstrom) zeigt, dass diese Grundaussage weiterhin gültig bleibt. Es gibt allerdings im Detail Unterschiede zu den Prognosen von 2012:

1. Geringere Transport-Änderungen seewärts Dukegat. Begründung: Die betrachteten Querprofile queren nur noch die Westerems und führen nicht mehr vom niederländischen Ufer

- durch die Wester- und Osterems zum deutschen Ufer (siehe Bild 10). Die betrachteten Querprofile sind deutlich kürzer, die Transport-Änderungen geringer.
2. Größere Transport-Abnahmen in der Außenems zwischen Dukegat und dem Emdener Fahrwasser. Begründung: Die Abnahmen im Transport im aktuellen Modell betragen etwa 1 % des Gesamttransports und sind zu einem großen Anteil auf Abnahmen des Schwebstoffgehalts zurückzuführen. Diese nehmen zwischen Dukegat (Ems-km 66) und Knock (Ems-km 50) im Mittel um knapp 3 mg/l ab, was etwas mehr als 1 % des Schwebstoffgehalts in diesem Abschnitt entspricht (mittlerer Schwebstoffgehalt = 0,21 g/l). Hinweis: Der advective Schwebstofftransport z.B. mit dem Flutstrom kann vereinfacht als Produkt aus dem mittleren Schwebstoffgehalt, der mittleren Flutstromgeschwindigkeit, der Querschnittsfläche und der Flutstromdauer abgeschätzt werden. D.h. dass der Transport proportional zu jeder der genannten Einzelgrößen (z.B. Schwebstoffgehalt) ist. Im Vergleich zum Gutachten 2012 ist das Baggervolumen in diesem Abschnitt etwa doppelt so groß (siehe Kapitel 3.1). Entsprechend stärker reduzierte Bodenschubspannungen und Erosionsflüsse vermindern den Schwebstoffgehalt in größerem Maß als im Gutachten-Modell von 2012.
 3. Keine Transport-Zunahmen im Bereich der Querschnittseinengung, sondern nur eine Reduzierung der Transport-Abnahmen in diesem Bereich. Begründung: Die Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten ist geringer als im Gutachten 2012 (siehe Kapitel 5.3), bedingt durch die größere ausbaubedingte Zunahme der Wassertiefe und eine geringere Querschnittseinengung. Das bedeutet, dass die verbliebenen Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der Querschnittseinengung nicht mehr vollständig die Transport-Abnahmen seewärts der Einengung kompensieren können.
 4. Geringere Transport-Abnahmen in der Unterems. Begründung: Die Abnahme des Schwebstoffgehalts und des Tideprismas (näherungsweise des Tidehubs) ist in den aktuellen Prognosen ebenfalls reduziert.

Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes ist die positive Wirkung der Querschnittseinengung auf die Hydrodynamik in der Unterems (Anhebung des Tideniedrigwassers, Reduktion des Energieeintrags, der Tide-Asymmetrie und der Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport) weiter vermindert. Als Folge ist die ausbaubedingte Abnahme des advektiven Schwebstofftransports im Emdener Fahrwasser stromauf der Querschnittseinengung und in der Unterems sowohl im Flutstrom als auch im Ebbestrom dem Betrag nach kleiner. Ursache ist der Rückgang der Abnahme des Schwebstoffgehalts bis hin zur Aufhebung der Abnahme in Teilen der Unterems und der Rückgang der Abnahme des Tidehubs und damit des Tideprismas. Es bleibt aber auch mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes bei Abnahmen des Transports von Schwebstoffen mit dem Flut- und Ebbestrom.

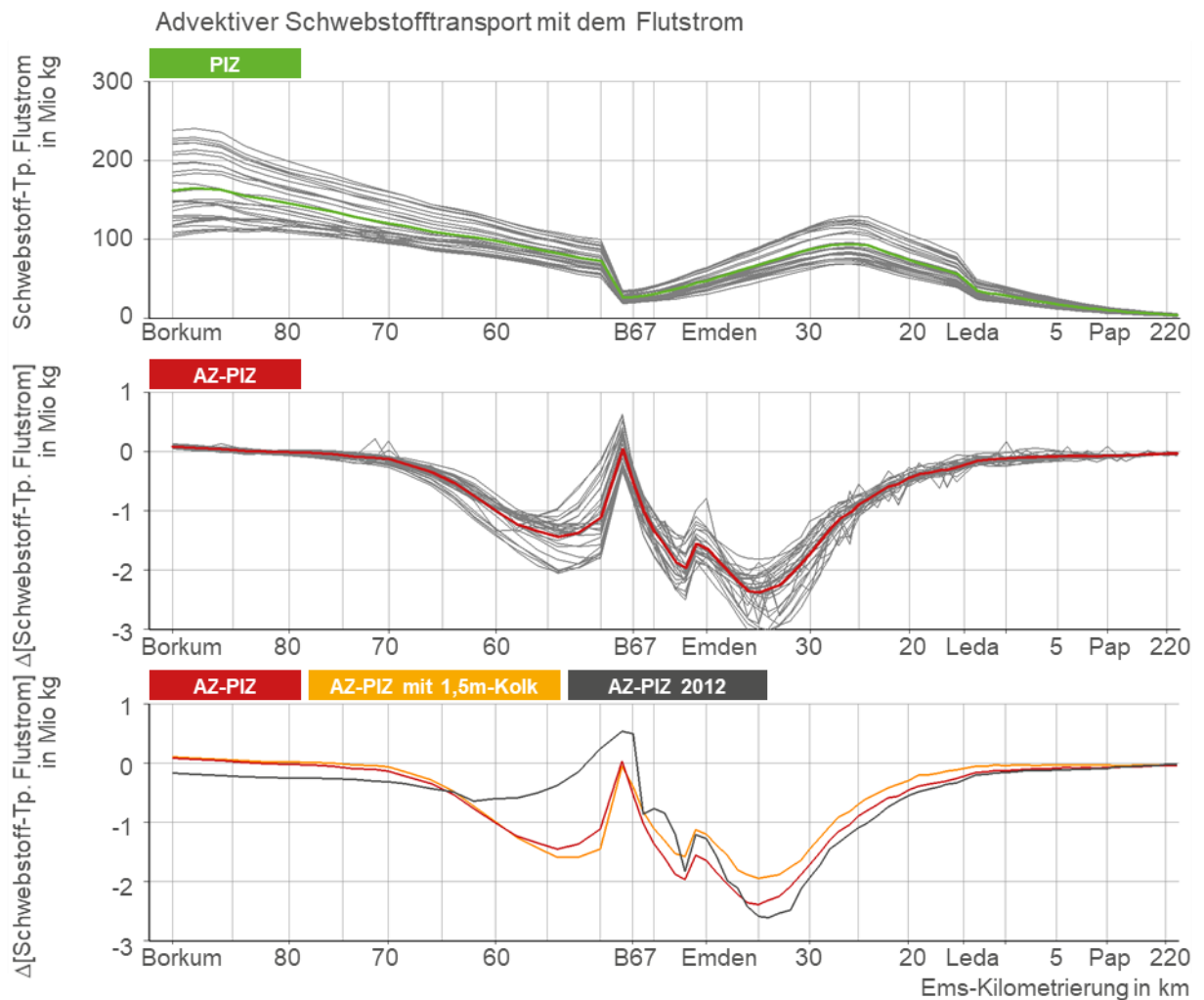


Bild 26: Querschnittsintegrierter advektiver Schwebstofftransport mit dem Flutstrom und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Schwebstofftransport mit dem Flutstrom im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte Schwebstofftransport mit dem Flutstrom (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

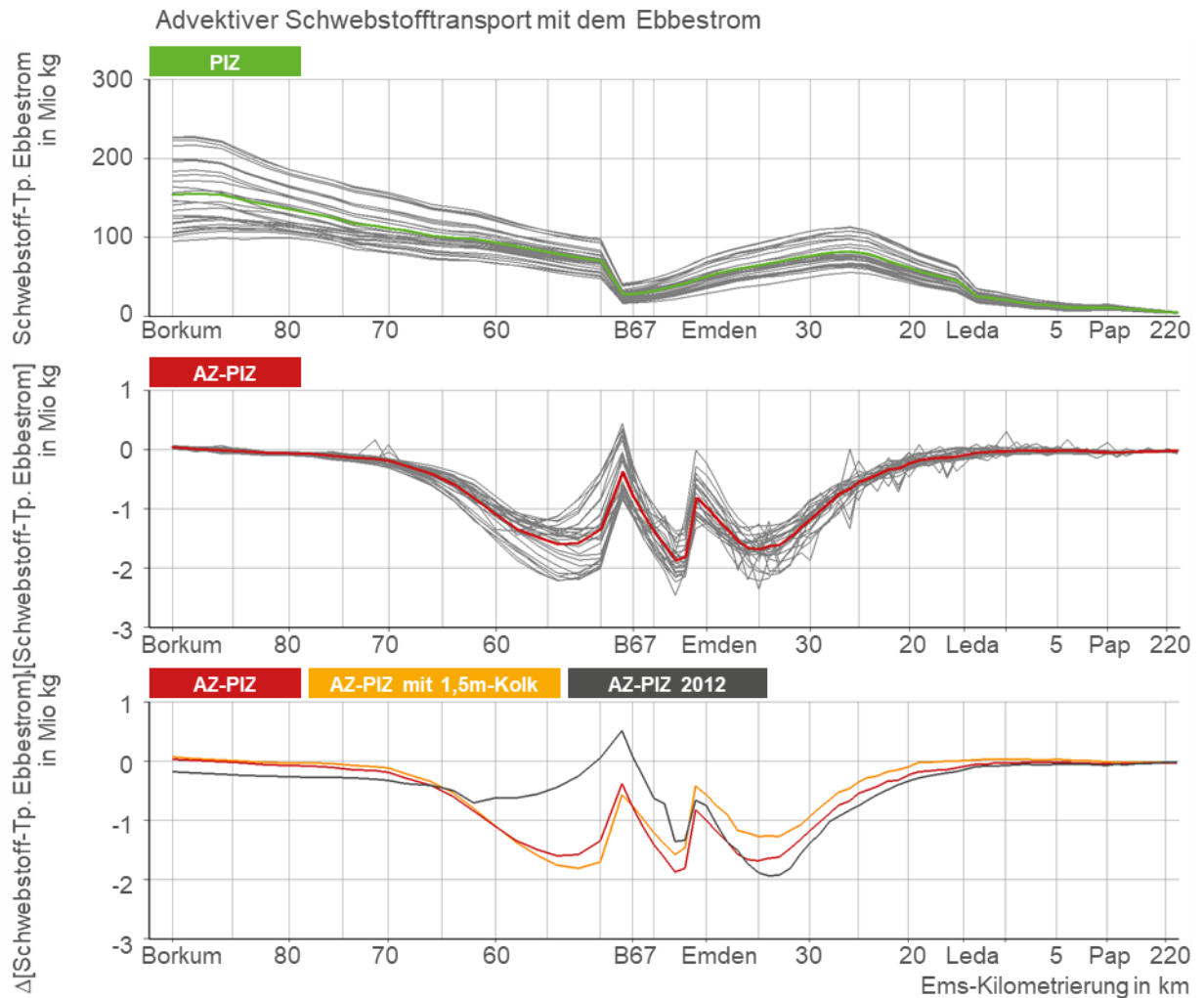


Bild 27: Querschnittsintegrierter advektiver Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte Schwebstofftransport mit dem Ebbestrom (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, wird sich in der Unterems die vorhandene Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport durch den Ausbau tendenziell verringern. Dies ist auf die Verbreiterung der Fahrwinne zur Wendestelle (erhöhte Sedimentation) und auf die Tidehub-Reduzierung stromauf der Querschnittseinengung und damit auf die Verringerung der Tide-Asymmetrie zurückzuführen.

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen (siehe Bild 28) zeigt, dass die tendenzielle Abnahme der Flutstrom-Dominanz in der Unterems unverändert prognostiziert wird. Das gilt auch bei Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes im Bereich der Querschnittseingung.

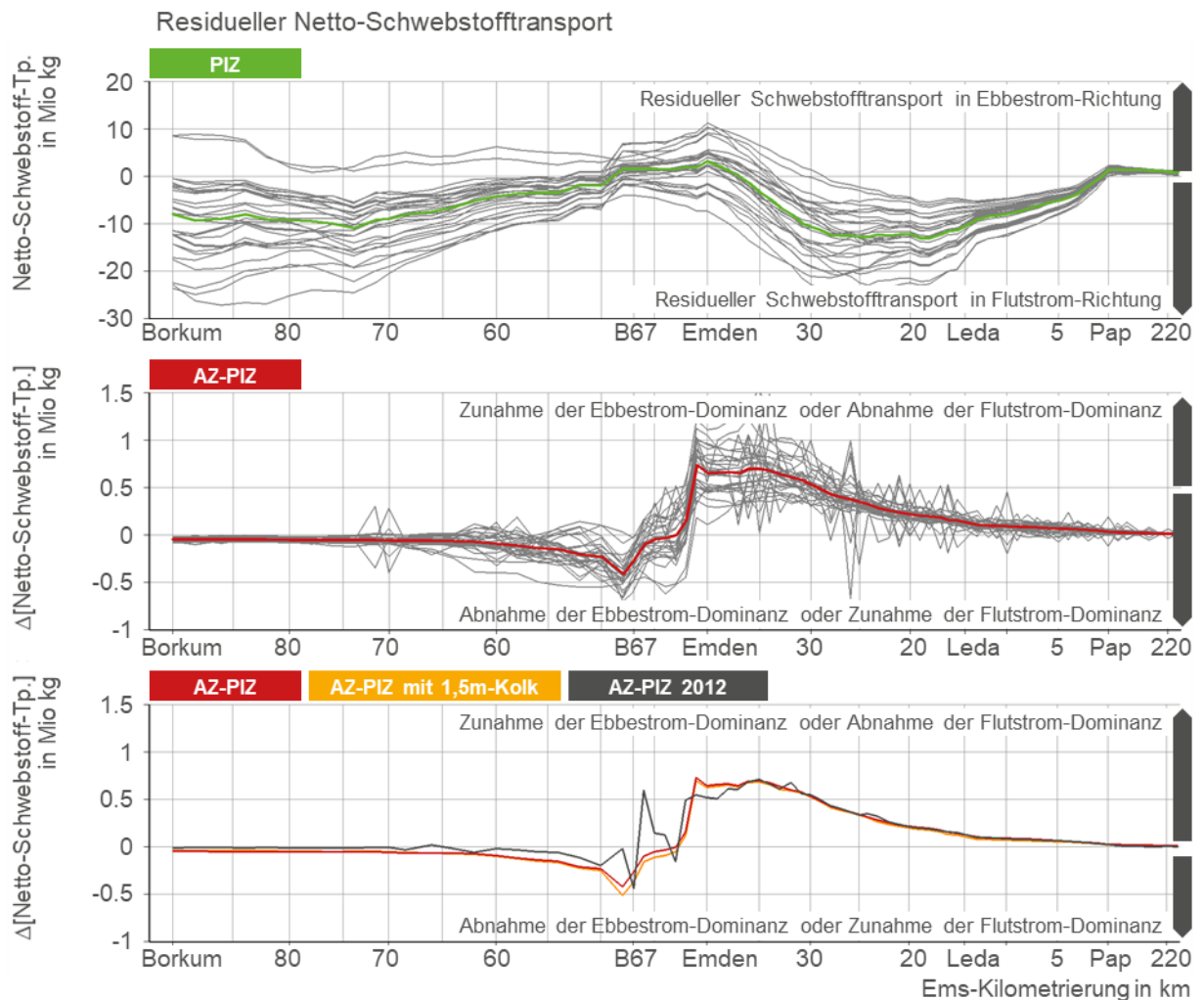


Bild 28: Querschnittsintegrierter advektiver Netto-Schwebstofftransport und ausbaubedingte Änderung im Längsschnitt zwischen Borkum und Papenburg:
 Oben: Netto-Schwebstofftransport im PIZ getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und der über alle Tiden gemittelte Netto-Schwebstofftransport (grün).
 Mitte: Ausbaubedingte Änderung (AZ minus PIZ) getrennt für alle 28 Tiden des Analyse-Zeitraums 2015 (grau) und die mittlere Änderung (rot).
 Unten: Zum Vergleich die mittleren Änderungen (AZ minus PIZ) für den aktuellen Ausbau-Zustand (rot), für den aktuellen Ausbau-Zustand plus 1,5-m-Kolk (orange) und für den Ausbau-Zustand aus dem Gutachten von 2012 (dunkelgrau).

In der Außenems seewärts der Hauptbaggerstrecke ist dagegen eine Zunahme der Flutstrom-Dominanz zu erkennen. Ursache ist das zusätzliche Baggervolumen in diesem Bereich (siehe Kapitel 3.1). Der Reibungseinfluss auf die Dissipation der Tideenergie nimmt stärker ab, womit im Vergleich weniger Tideenergie in Wärme dissipiert wird und mehr Tideenergie für die mechanische

Arbeit zur Verfügung steht: Als Folge kann das Tideniedrigwasser weiter absinken, die Tide-Asymmetrie nimmt stärker zu und führt letztlich zu einer größeren Zunahme der Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport.

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, werden sich die Baggermengen im Bereich der Hauptbaggerstrecke erhöhen, denn die ausbaubedingten Änderungen 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 Emders Fahrwasser 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.

Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass die genannten Zahlen nach Oben korrigiert werden müssen:

- Im Bereich Knock muss jetzt von der doppelten Menge ausgegangen werden (200 statt 100 t/Tide ausbaubedingte Zunahme des Nettotransportes aus der Außenems in die Hauptbaggerstrecke).
- Im Bereich Pogum beträgt die ausbaubedingte Abnahme des Nettotransportes in die Unterems 700 statt 500 t/Tide.

Daraus folgt, dass auch die ausbaubedingte Zunahme der Baggermenge entsprechend von 10 % auf 15 % angehoben werden muss.

Wie im Gutachten 2012 geschrieben, werden sich die Baggerschwerpunkte ausbaubedingt verändern: Im Bereich der Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung werden die Baggermengen sinken, ggf. stellt sich ein Kolk ein, so dass dauerhaft keine weiteren Baggertätigkeiten notwendig sind. Weiter oberhalb, insbesondere im Bereich der neuen Wendestelle, und weiter unterhalb bis Ems-km 53 werden die Unterhaltungsaufwendungen jedoch deutlich ansteigen.

Die Baggermengen in der Unterems werden trotz des verringerten Eintrags von Unterstrom nicht nennenswert reduziert werden, weil dort die Baggertätigkeiten zur Herstellung der notwendigen Fahrrinntiefe für die Überführung großer Werftschiffe nach unserem Verständnis zuerst über die großen Sediment-Vorräte innerhalb der Unterems generiert werden. Große Sediment-Vorräte sind z.B. in den Bühnenfeldern und in der Flügelschicht vorhanden. Dafür spricht, dass die Fahrrinne schon wenige Wochen nach einer Baggerkampagne wieder eine deutlich reduzierte Wassertiefe aufweist. Diese Sedimentationsmengen können in dieser kurzen Zeitspanne nicht vollständig aus der Außenems kommen. Die ausbaubedingte Reduzierung des Eintrags von Schwebstoffen aus der Außenems in die Unterems wird die Vorräte etwas langsamer auffüllen, dies kann aber erst mittelfristig (nach mehreren Jahren) zu einer merklichen Abnahme der Baggermengen führen.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse (Kapitel 5) führt zu folgender Zusammenfassung bezüglich der gutachterlichen Aussagen:

Wasserstand:

Die Querschnittseinengung durch die Verlängerung des Bühnenpaars bestimmt die Qualität der ausbaubedingten Änderungen. Seewärts bis zur Querschnittseinengung nimmt der Tidehub zu, stromauf der Querschnittseinengung nimmt der Tidehub ab. Die Tidehub-Änderungen resultieren größtenteils aus den Änderungen im Tideniedrigwasser. Die Grundaussage aus 2012, wonach das Tideniedrigwasser in der Unterems um bis zu 1 cm angehoben wird, liegt trotz Zunahme im Baggervolumen weiterhin auf der sicheren Seite. Unter Berücksichtigung eines 1,5 m tiefen Kolkes zwischen der geplanten Bühnenverlängerung ist die Anhebung des Tideniedrigwassers aufgehoben und der Tidehub in der Unterems genauso hoch wie im planerischen Vergleichszustand.

Strömungsgeschwindigkeit:

Die Querschnittseinengung ist diejenige Einzelmaßnahme des Ausbauvorhabens mit der größten Einzelwirkung auf die Strömungsgeschwindigkeiten. Vor und hinter der Querschnittseinengung nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne zu und im Stromschatten der verlängerten Bühnen ab. Die Zunahmen in der Fahrrinne fallen mit den aktuellen Modellrechnungen geringer aus, weil die Tiefenzunahme durch die Berücksichtigung eines Eingriffshorizonts zur Vermeidung von Mindertiefen größer ist als 2012 und weil die Querschnittseinengung durch höhere geometrische Auflösung im Berechnungsgitter präziser approximiert werden kann. Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes zwischen der geplanten Bühnenverlängerung fällt die Querschnittseinengung noch geringer aus. Im Ergebnis führen beide Aspekte zu einer geringeren Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung. Die Aussagen aus dem Gutachten 2012 können bezüglich der Wirkung der Querschnittseinengung auf die Strömungsgeschwindigkeiten als eine auf der sicheren Seite liegende Maximal-Abschätzung betrachtet werden, die für weitergehende naturschutzfachliche Bewertungen nach unten korrigiert werden kann.

Die geplante Wendestelle kurz vor Emden führt zu einer Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten als Folge der Querschnittsaufweitung durch Vertiefung und insbesondere Verbreiterung der Fahrrinne. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass diese Abnahmen im aktuellen Modell größer ausfallen, also die Querschnittsaufweitung effektiv größer ist. Ursache ist das größere Baggervolumen zur Herstellung der Tiefen im Bereich der Wendestelle unter Berücksichtigung eines Eingriffshorizonts.

Seewärts der Hauptbaggerstrecke sind die ausbaubedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit abhängig von der vorherrschenden Tiefenverteilung im Ist-Zustand und der daraus resultierenden Tiefenänderung zur Herstellung des Ausbau-Zustandes. Die Aktualisierung der Datengrundlage vom digitalen Geländemodell 2010 zum digitalen Geländemodell 2015 führt dazu, dass die beobachtete Sedimentation in diesem Zeitraum und in diesem Abschnitt das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes anhebt. Als Folge nehmen die lokalen Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten zu.

In der Unterems stromauf Ems-km 35 sind die ausbaubedingten Änderungen der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten kleiner als 2 cm/s.

Salzgehalt und Salzintrusion:

Die ausbaubedingten Änderungen des Salzgehalts lassen sich auf zwei Effekte zurückführen: Erstens führt eine Vertiefung zu einer Zunahme der baroklinen Kräfte. Daraus folgt, dass mit ausbaubedingt zunehmender Wassertiefe auch die gravitative Zirkulation zunimmt. Die Salzintrusion gelangt weiter nach stromauf. Zweitens führen ausbaubedingte Strömungsänderungen zu einer Veränderung der Advektion der Salzmasse mit der Strömung. Diese Prozesse führen in beiden Modellen zu ähnlichen ausbaubedingten Änderungen, allerdings fallen diese Änderungen in der Unterems in den aktuellen Modellrechnungen dem Betrag nach etwas geringer aus. Ursache ist, dass der advective Transport des Salzes durch die Strömung in zwei Bereichen der Ausbaustrecke weniger zunimmt, bzw. stärker abnimmt, als im Gutachten 2012 genannt: Erstens sind im Bereich der Querschnittseinengung die Zunahmen der Strömungsgeschwindigkeit geringer und zweitens sind im Bereich der Wendestelle die Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeit dem Betrag nach größer. Die aktuellen Berechnungen zur ausbaubedingten Verlagerung der Brackwasserzone bestätigen die auf der sicheren Seite liegenden Prognosen des Gutachtens von 2012, mit folgender Ausnahme: Die ausbaubedingte Verlagerung der Brackwasserzone seewärts von Knock um weniger als 100 m kann sowohl nach Unterstrom als auch nach Oberstrom erfolgen.

Schwebstoffhaushalt und Baggermengen:

Der maximale und mittlere Schwebstoffgehalt nimmt in der Unterems sowie im Emdener Fahrwasser bis zur Querschnittseinengung 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. Die Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung führt zu einer Abnahme des Tidehubs in der Unterems und sorgt somit über die Abnahme der Tide-Asymmetrie für eine zusätzliche Abnahme des Schwebstoffgehalts in der gesamten Unterems, im DEK bis Herbrum und im Leda-Jümme-Gebiet. Diese Grundaussage bleibt weiterhin gültig. Die Abnahmen im Schwebstoffgehalt sind aktuell allerdings geringer als 2012 prognostiziert. Dies hat zwei Gründe: Erstens ist das Baggervolumen zur Herstellung des Ausbau-Zustandes größer als 2012 prognostiziert. Zweitens ist die Wirkung der Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung reduziert. Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes ist die positive Wirkung der Querschnittseinengung auf die Hydrodynamik in der Unterems weiter vermindert. Als Folge ist die ausbaubedingte Abnahme des Schwebstoffgehalts in Teilen der Unterems aufgehoben und damit genauso hoch wie im planerischen Vergleichszustand.

Der advective Transport von Schwebstoffen nimmt in der Außen- und Unterems sowohl mit dem Flutstrom als auch mit dem Ebbstrom ab. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass diese Grundaussage weiterhin gültig bleibt. Mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes ist die positive Wirkung der Querschnittseinengung auf den Schwebstofftransport in der Unterems (Anhebung des Tideniedrigwassers, Reduktion des Energieeintrags und der Tide-Asymmetrie) vermindert. Ursache ist der Rückgang der Abnahme des Schwebstoffgehalts bis hin zur Aufhebung der Abnahme in Teilen der Unterems und der Rückgang der Abnahme des Tidehubs und damit des Tideprismas. Als Folge ist die ausbaubedingte Abnahme des advectiven Schwebstofftransports stromauf der Querschnittseinengung dem Betrag nach kleiner. Es bleibt aber auch mit Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes bei Abnahmen des Transports von Schwebstoffen mit dem Flut- und Ebbstrom.

Die vorhandene Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport wird sich in der Unterems durch den Ausbau tendenziell verringern. Dies ist auf die Verbreiterung der Fahrrinne zur Wendestelle (erhöhte Sedimentation) und auf die Tidehub-Reduzierung stromauf der Querschnittseinengung und damit auf die Verringerung der Tide-Asymmetrie zurückzuführen. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass die tendenzielle Abnahme der Flutstrom-Dominanz in der Unterems unverändert prognostiziert wird. Das gilt auch bei Berücksichtigung eines 1,5-m-Kolkes im Bereich der Querschnittseinengung. In der Außenems seewärts der Hauptbaggerstrecke ist dagegen eine Zunahme der Flutstrom-Dominanz zu erkennen. Ursache ist das zusätzliche Bagger-volumen in diesem Bereich, das Tideniedrigwasser sinkt weiter ab, die Tide-Asymmetrie nimmt stärker zu und führt letztlich zu einer größeren Zunahme der Flutstrom-Dominanz im Schwebstoff-Transport.

Die Baggermengen im Bereich der Hauptbaggerstrecke werden sich ausbaubedingt erhöhen. Es kommt mehr von der Außenems hinein und es geht weniger in die Unterems hinaus. Der Vergleich mit den aktuellen Modellrechnungen zeigt, dass die 2012 prognostizierten Baggermengen-Zunahmen von 10 % auf nun 15 % infolge der überarbeiteten Planung angehoben werden müssen, weil sowohl mehr Schwebstoffe von der Außenems in die Hauptbaggerstrecke kommen als auch weniger Schwebstoffe die Hauptbaggerstrecke in Richtung Unterems verlassen. Die Baggerschwerpunkte werden sich ausbaubedingt verändern: Im Bereich der Querschnittseinengung durch die Bühnenverlängerung werden die Baggermengen sinken, ggf. stellt sich ein Kolk ein, so dass dauerhaft keine weiteren Baggertätigkeiten notwendig sind. Weiter oberhalb, insbesondere im Bereich der neuen Wendestelle, und weiter unterhalb bis Ems-km 53 werden die Unterhaltungsaufwendungen jedoch deutlich ansteigen.

Die veränderten Randbedingungen (überarbeitete Planung, Erweiterung der Simulationsmethode und Aktualisierung der Rand- und Anfangswerte zusammen mit der Topographie) führen dazu, dass sich die Berechnungsergebnisse der aktuellen Modellrechnungen im Vergleich zu den ausbaubedingten Änderungen von 2012 verändert haben. Es zeigt sich dennoch, dass die gutachterlichen Aussagen aus 2012, basierend auf der Interpretation und Bewertung der Simulationsergebnisse, weiterhin auf der sicheren Seite liegen, so dass sie auch unter Berücksichtigung der überarbeiteten Planungsgrundlagen weiterhin gültig und belastbar sind, mit folgenden Ausnahmen:

- Die geplante Wendestelle kurz vor Emden führt zu einer dem Betrag nach größeren maximalen Abnahme der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten von 0,15 m/s auf nun 0,2 m/s.
- Die ausbaubedingte Verlagerung der Brackwasserzone seewärts von Knock um weniger als 100 m kann sowohl nach Unterstrom als auch nach Oberstrom erfolgen.
- Die Zunahmen der Baggermengen im Rahmen der Unterhaltung der Fahrrinntiefen müssen von 10 % auf nun 15 % angehoben werden.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, im Dezember 2021

Im Auftrag

Bearbeitung

Dr.-Ing. Jessica Kelln

Dipl.-Ing. (FH) Jens Jürges

Anton Rosenhagen M. Sc.

7 Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft (ARGE) smile consult– Inphoris (2016): Aufbau eines digitalen Geländemodells des Unter- und Außenems-Wasserlaufes 2015 (DGM-W Unter-/Außenems-2015). Abschlussbericht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2012): Vertiefung der Außenems bis Emden – Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW-Gutachten, A3955 03 10144). Online verfügbar unter <https://www.kuestendaten.de/Tideems/DE/Projekte/Vertiefung-der-Aussenems-bis-Emden/Planfeststellungsverfahren/Planfeststellungsverfahren-node.html> (J1.1), zuletzt geprüft am 4.8.2021.

Bundesanstalt für Wasserbau (2021): Validierungsdokument Ems-Modell 2015 (BAW-Gutachten, B3955.03.10.10208).

Casulli, Vincenzo (2009): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface Hydrodynamics. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, 60:391-408. DOI: 10.1002/flid.1896.

Rodi, Wolfgang (1987): Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids. In: J. Geophys. Res. 92 (C5), S. 5305. DOI: 10.1029/JC092iC05p05305.