

14. Dezember 2017

**Ergänzende  
Erläuterungen  
zur Sediment-  
verdriftung**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. ANLASS UND FRAGESTELLUNG.....</b>	<b>7</b>
<b>2. EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
2.1 Naturbedingungen im Fehmarnbelt .....	7
2.2 Das Modell als quantitatives Analysewerkzeug .....	11
2.3 Simulation der Sedimentverdriftung.....	13
Drei Teilmodelle zur Simulation der Sedimentverdriftung.....	13
Fünf Sedimentfraktionen abgeleitet aus Felduntersuchungen und Labortests .....	17
<b>3. STELLUNGNAHMEN VON PROF. DR. SCHÜTTRUMPF .....</b>	<b>20</b>
3.1 Räumliche Auflösung der numerischen Modelle .....	22
3.2 Verifikation der Modelle .....	31
3.3 Berücksichtigung von Extremwerten und Extremsturmfluten.....	42
3.4 Nachweis der Hochwasserneutralität .....	45
3.5 Regenerationszeit des Meeresbodens.....	46
3.6 Berücksichtigung von deutschen Daten, Unterlagen, Dokumenten, Regelwerken, Gesetzen und Generalplänen .....	48
3.7 Modell zur Badegewässerqualität .....	53
3.8 Kalibrierung des Modells zur Sedimentverdriftung .....	54
3.9 Kumulation der natürlichen und projektbürtigen Schwebstoffe und Sedimentation .....	56
<b>4. PUNKTE AUS BISHERIGEN SACHVERHALTSERMITTLUNGEN.....</b>	<b>59</b>
4.1 Punkt 13: Grabenauflösung in den numerischen Modellen .....	60
4.2 Punkt 14: Aussagen zu Sauerstoffmangelsituationen im Graben .....	62
4.3 Punkt 16: Wiederverfüllung des Tunnelgrabens, Erosions- und Kolkungsprozesse über der Tunnelabdeckung .....	65
4.4 Punkt 17: Sedimentfreisetzung bei Baggergut (Freisetzungsraten, Sedimentzusammensetzung) sowie Eingangsdaten der Sedimenttransportberechnung .....	67

<b>4.5</b>	<b>Punkt 18: Berücksichtigung von Sedimenten im offenen Graben.....</b>	<b>74</b>
<b>4.6</b>	<b>Punkt 19: Herleitung der Wirkschwellen bei benthischer Flora (einschließlich der Gleichverteilung von Sedimentationsereignissen über das Jahr) .....</b>	<b>76</b>
	Wirkschwelle für Schwebstoffe .....	76
	Wirkschwelle für Sedimentation .....	77
<b>5.</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>82</b>
<b>6.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>84</b>

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sedimenteintrag an der Küste Fehmarns – Konzentration deutlich über 100 mg/l (Bildquelle: NDR.de, Katrin Kunkel).....	7
Abbildung 2: Westliche Ostsee und ihre Meeresgebiete (Farbverlauf zeigt Wassertiefen) .....	8
Abbildung 3: Küstenerosion bei Wallnau auf Fehmarn durch Sturmtief Axel. Wellen und Strömung haben große Mengen Sediment in die Ostsee getragen, vor dem Sturm überdeckte das Kliff die jetzt sichtbaren Steine. (Bildquelle: NDR.de) .....	9
Abbildung 4: Überblick über Hydrodynamik und Windverhältnisse an Station MS01 im Jahr 2005 (vgl. FEHY (2013b)) .....	14
Abbildung 5: Repräsentativität des Kalibrierungs- und Validierungszeitraums, Vergleich mittlerer monatlicher Windgeschwindigkeit mit langjährigen Daten (1970-2009) (vgl. Anlage 15 Anhang A, Kap. 0.1.2.2.3.4., S. 48).....	15
Abbildung 6: Repräsentativität des Kalibrierungs- und Validierungszeitraums, Vergleich mittlerer monatlicher oberflächennaher Strömungsgeschwindigkeit (oben) und sohnaher Strömungsgeschwindigkeit (unten) mit langjährigen Daten (1970-2009) (FEHY 2013c).....	16
Abbildung 7: Lage der geotechnischen Meeresbodenerkundungen (Sedimentkernentnahmen) (vgl. Anlage 15 Anhang B Methodik, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 811 und FEHY (2013b)) .....	18
Abbildung 8: Korngrößenverteilung für die Probenummer 2 (A003 BS1) 50 cm unter Meeresboden. Postglazialer Sand (Ton < 0,002 mm, Schluff < 0,002mm-0,063 mm, Sand >0,063 mm) (vgl. Anlage 15 Anhang B Methodik, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 811 und FEHY (2013b) Anhang D) .....	19
Abbildung 9: Prinzipskizze der Überströmung des offenen Tunnelgrabens in der Bauphase. Die Strömungsprofile im An- und Abstrom sind nahezu identisch während die Strömung im Graben deutlich reduziert ist.....	24
Abbildung 10: Geschwindigkeitsprofil 1 km (links) und 2km (rechts) stromabwärts vom Graben.....	25
Abbildung 11: Zusammenfassung der horizontalen Modellauflösungen im Trassenbereich für die unterschiedlichen verwendeten hydrodynamischen 3D-Modelle. ....	26
Abbildung 12: Simulierte und gemessene Salzgehalte an der Station N01 (oberflächen- und bodennah). Die verschiedenen Modellergebnisse basieren auf unterschiedlich hoch aufgelösten Rechennetzen im Fehmarnbelt; v10.42:	

Brückenszenario, ca. 700 m; v14.12: Tunnelszenario 100 m; v12.01: Tunnelszenario 30 m (nur November). Einheit der Y-Achsen [PSU]. .....	27
Abbildung 13: Vergleich zwischen gemessener und mit dem regionalen Ostseemodell (MIKE 3 FM HD) simulierter Entwicklung der gelösten Sauerstoffkonzentration (DO) an der Station K02 im Bornholmer Becken in dem Kalibrierungszeitraum (1970-1999, oben) und dem Validierungszeitraum (2000-2007, unten).....	35
Abbildung 14: Simulierte sohnnahe und oberflächennahe Salzgehalte aus dem Fehmarnbeltmodell GETM im Vergleich zu den Messungen an der Station N01 aus 2005.....	37
Abbildung 15: Kalibrierungsergebnisse für Salzgehalt (oben) und Temperatur (unten) an der Station N01 (oberflächen- und bodennahe Werte).....	37
Abbildung 16: Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten und Richtungen der sohnnahen Strömung an der festen Messstation MS02 im Fehmarnbeltmodell. Sohlrauheit: $k_{a,g} = 0,05$ mm und $k_{a,g} = 0,025$ m .....	40
Abbildung 17: Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten der sohnnahen Strömung bei MS02. Detaillierte Darstellung von Zeiträumen im September und Oktober. ....	40
Abbildung 18: Kalibrierungsergebnisse des Fehmarnbeltmodells MIKE 3 FM HD zum gemessenen (blau) und zum simulierten Wasserstand (rot) in Warnemünde an der Station MS03. ....	41
Tabelle 1: Modellfraktionen, Sinkgeschwindigkeiten und kritische Schubspannungen für Deposition und Erosion im Sedimenttransportmodell (MIKE 3 MT).....	55
Tabelle 2: Ausschnitt des Bauablaufplans für den Absenktunnel, Herstellung der Umschließungsdämme der Landgewinnungsflächen (vgl. FEHY (2013b) Anhang A, die Tabelle setzt sich nach rechts (fortlaufende Zeit) und unten (weitere Arbeitsschritte) fort). ....	70
Tabelle 3: Ausschnitt des Bauablaufplans für den Absenktunnel, Herstellung des Tunnelgrabens (vgl. FEHY (2013b) Anhang A, die Tabelle setzt sich nach rechts (fortlaufende Zeit) und unten (weitere Arbeitsschritte) fort). ....	70
Tabelle 4: Zusammengefasste Arbeitsschritte, Sedimentfreisetzungsraten, Sedimentvolumen und –massen, Trockendichten sowie Baggertypen und Ort der Sedimentfreisetzung in der Wassersäule zur Prognose der Sedimentverdriftung beim Bau des Absenktunnels.....	71
Tabelle 5: Modelle zur Analyse der direkten und indirekten Projektwirkungen im marinen Bereich und deren Auswirkungen auf die entsprechenden Schutzgüter. ....	84

Tabelle 6: Ausgewählte nationale und internationale Referenzprojekte zur  
Modellanwendung und zum Monitoring der DHI-Gruppe ..... 86

## 1. Anlass und Fragestellung

Die Modellierung der projektbedingten Sedimentverdriftung ist ein wesentliches Element der Ermittlung der marinen Umweltauswirkungen im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung. Im Verlauf des Planfeststellungsverfahrens hat die Anhörungs- und Planfeststellungsbehörde Fragen in Form einer Sachverhaltsermittlung im Juli 2014 und einer Stellungnahme im Dezember 2015 formuliert, die von den Vorhabenträgern mit Stellungnahmen im August 2015 und März 2016 beantwortet wurden.

Weiterhin wurde der Themenkomplex Sedimentverdriftung mitsamt der zugrunde liegenden Daten- und Modellbasis in beiden Runden der öffentlichen Beteiligung mit verschiedenen Beteiligten erörtert. Ausgangspunkt der Erörterung waren hauptsächlich die Stellungnahmen und Vorträge von Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf.

Die Vorhabenträger haben im Nachgang des zweiten Erörterungstermins 2017 zugesagt, ein Dokument zu erstellen, welches sich mit der Kritik von Prof. Dr. Schüttrumpf auseinandersetzt (Kapitel 3) und die Aspekte aus dem bisherigen Verfahrensverlauf aufgreift, zu denen seitens der Planfeststellungsbehörde noch Klärungsbedarf besteht (Kapitel 4).

## 2. Einleitung

### 2.1 Naturbedingungen im Fehmarnbelt

Das Vorhandensein und der Transport von Sedimenten wie Sand, Schluff oder Ton sind natürliche Phänomene, die in allen flachen Küstenmeeren wie auch der Westlichen Ostsee und dem Fehmarnbelt auftreten. In Flachwassergebieten sorgen Strömung und Wellen für die Mobilisierung von Sedimenten. Feine Partikel gehen in Suspension (Abbildung 1) oder werden im Wasser gelöst, gröbere Partikel werden entlang des Meeresbodens fortbewegt (Geschiebetransport).



Abbildung 1: Sedimenteintrag an der Küste Fehmarns – Konzentration deutlich über 100 mg/l (Bildquelle: NDR.de, Katrin Kunkel)

# Femern

## Sund ≈ Bælt

Die Westliche Ostsee ist von wechselnden und unregelmäßigen Wetter- und meteorologischen Bedingungen bestimmt, die Strömung und Wellen im Fehmarnbelt wesentlich beeinflussen. Als Folge ist auch der Sedimenttransport von diesen wechselnden Randbedingungen geprägt. In Zeiten rauhen Wetters mit hohen Wellen und starken Strömungen wird Sediment vom Meeresboden und der Küste (Resuspension und Erosion<sup>1</sup>) abgetragen und fortbewegt. In ruhigen Zeiten setzen sich Sedimente und Schwebstoffe am Meeresboden ab (Sedimentation oder Deposition<sup>2</sup>), bis sie beim nächsten energiereichen Ereignis erneut weiterbewegt werden. Schließlich erreichen die Sedimente Meeresgebiete, in denen die Bedingungen dauerhaft so ruhig sind, dass ein weiterer Transport nicht stattfindet. Man spricht dann von Absetzgebieten, in denen sich der Großteil der transportierten Sedimente (natürliche wie auch projektbedingt freigesetzte) abgelagert. Ein Beispiel für ein solches Absetzgebiet in der Westlichen Ostsee ist das Arkonabecken (Abbildung 2).

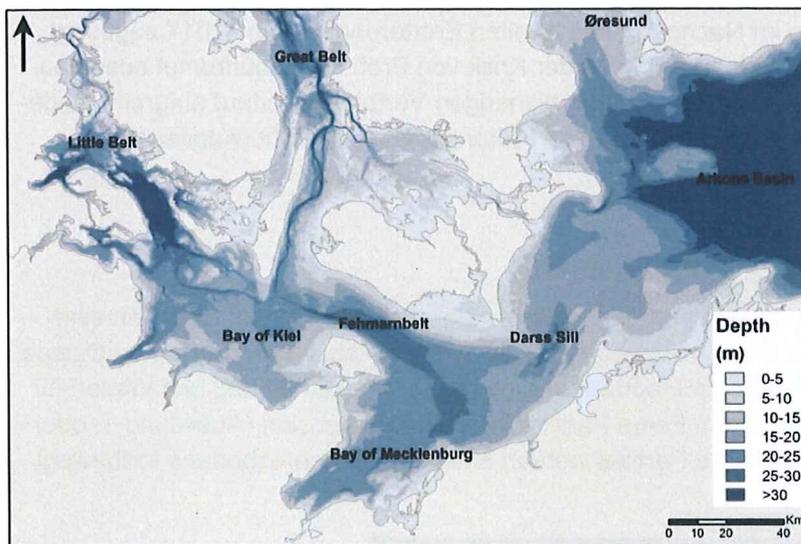


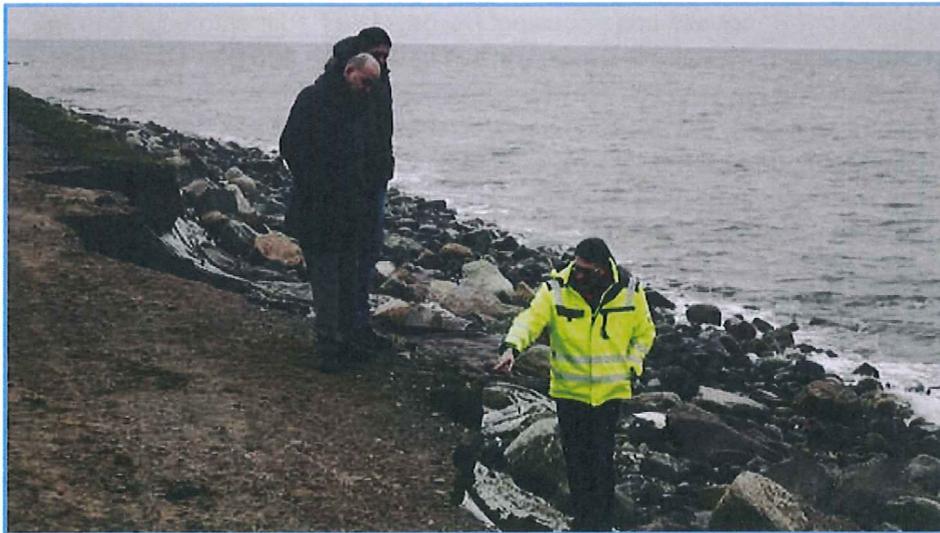
Abbildung 2: Westliche Ostsee und ihre Meeresgebiete (Farbverlauf zeigt Wassertiefen)

Für dynamische Gebiete wie den Fehmarnbelt sind daher Sedimenteintrag, Transport, Sedimentation und Erosion natürliche und ständig vorkommende Prozesse. Sie prägen den Naturraum und tragen zu Entstehung und Erhalt von charakteristischen Strukturen bei. So bilden sich zum Beispiel die Meeresbodenformen durch Erosion und Sedimentation und erhalten ihre Dynamik (die Mega-Rippel etwa sind ständig in Bewegung und verändern ihre Position um 5-10 Meter pro Jahr).

<sup>1</sup> Sowohl durch Resuspension als auch durch Erosion werden Sedimente durch Strömung in die Wassersäule eingetragen. Resuspension bezeichnet speziell den Prozess der Wiederaufwirbelung von (kürzlich) abgelagerten Sedimenten, während Erosion allgemein den Abtrag von (Sediment-)Partikeln einer Oberfläche (Meeresboden oder Küste) bezeichnet.

<sup>2</sup> Die Begriffe Sedimentation und Deposition werden in den Planfeststellungsunterlagen, Planänderungsunterlagen und in diesem Dokument synonym verwendet.

Das marine Ökosystem im Fehmarnbelt wird ebenso von Sedimentations- und Erosionserignissen geprägt, wie auch von den dadurch entstehenden wechselnden Gehalten von Sedimenten und Schwebstoffen in der Wassersäule (Trübung). Flora und Fauna im Fehmarnbelt und der Westlichen Ostsee sind an diese Bedingungen – ihre natürliche Umwelt – angepasst. In tiefen Bereichen des Belts und der Westlichen Ostsee (tiefer als ca. 6 m) liegen Schwebstoff- bzw. Sedimentkonzentrationen im Wasser meist unter 2 mg/l und sind somit nur zeitweilig als Trübungsbereiche sichtbar. Im flachen Wasser vor der Küste (etwa oberhalb der 6 m Linie) wie z.B. vor Fehmarn, schwanken die natürlichen Konzentrationen stark und übersteigen besonders in den Wintermonaten häufig 100 mg/l. Ereignisse wie die Sturmtiefs „Axel“, „Xavier“ und „Herwart“ im Jahr 2017 setzen regelmäßig große Sedimentmengen in der Ostsee frei, hauptsächlich durch Küstenerosion (Abbildung 3) und Abtrag vom Meeresboden.



**Abbildung 3: Küstenerosion bei Wallnau auf Fehmarn durch Sturmtief Axel. Wellen und Strömung haben große Mengen Sediment in die Ostsee getragen, vor dem Sturm überdeckte das Kliff die jetzt sichtbaren Steine. (Bildquelle: NDR.de)**

Das während der Bauarbeiten der Festen Fehmarnbeltquerung freigesetzte Sediment ist fast ausschließlich Material aus dem für die Tunnelelemente ausgehobenen Graben im Fehmarnbelt, d.h. es handelt sich um natürlicherweise dort vorkommendes Bodenmaterial. Nach der Freisetzung durch die Bauarbeiten (Primärfreisetzung) sorgen die gleichen physikalischen Prozesse – i.W. Strömung und Wellen – für Transport, Sedimentation und Erosion (bzw. Resuspension), die auch das Verhalten natürlicherweise in die Region eingetragener Sedimente bestimmen.

Umweltrelevante Aspekte bei der Sedimentfreisetzung sind zum einen die Sedimentation und die damit verbundene mögliche Überdeckung von Flora und Fauna auf dem Meeresboden und zum anderen die Trübung der Wassersäule durch eingetragene Partikel. Verstärkte Trübung sorgt für geringere Lichtdurchlässigkeit, wodurch die bodenlebenden Pflanzen beeinträchtigt werden können, die wiederum Lebensraum und Nahrung für Tiere sind.

Die projektbedingt im Wasser des Fehmarnbelts frei gesetzte Sedimentmenge ist im Vergleich zu natürlichen Quellen gering. Durch den Bau der Querung werden etwa 10% der natürlicherweise im Belt transportierten Feinsedimentmengen zusätzlich eingetragen, und die freigesetzte Menge liegt deutlich innerhalb der natürlich vorkommenden jährlichen Variabilität.

Zur Veranschaulichung: Würde das während der gesamten Bauphase frei gesetzte Sediment auf einmal über die Fläche des Fehmarnbelts ca. 10 km beidseitig der Trasse verteilt, ergäbe sich eine Schicht von etwa 1,7 mm auf dem Meeresboden. In Wirklichkeit wird die Sedimentbedeckung über die Fläche des Fehmarnbelts wesentlich dünner ausfallen – durchschnittlich etwa 0,2 mm –, da Teile des Sediments laufend durch Resuspension weiter transportiert und außerhalb des Belts abgelagert werden.

Die gesamte während der Bauphase projektbedingt frei gesetzte Sedimentmenge beträgt etwa 1,2 Mio. Tonnen oder 0,75 Mio m<sup>3</sup>. Davon werden etwa 1/3 (≈ 400.000 Tonnen) in Deutschen Gewässern eingetragen. Vor der Küste Fehmarns werden regelmäßig Schwebstoffkonzentrationen gemessen, die deutlich über den zu erwartenden rein projektbedingt ausgelösten Konzentrationen liegen. Messergebnisse an der Station NS08 vor der Küste Presens zeigen im Beobachtungszeitraum 2009 und 2010 regelmäßig Konzentrationen über 100 mg/l mit Maximalwerten über 200 mg/l in der Mitte der Wassersäule, während projektbedingt während der Bauphase Konzentrationen an dieser Stelle im einstelligen mg/l-Bereich liegen (Maximum unter 8 mg/l) (UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.3., Abbildung 0-261 unten, S. 851). Es ist zu beachten, dass natürliche und projektbedingt eingebrachte Sedimente und Schwebstoffe sich nicht kumulativ verhalten. Dies wird in Kap. 3.9 dieses Dokuments weiter ausgeführt.

Das Projekt Feste Fehmarnbeltquerung findet in einem marinen Ökosystem statt, das an hohe Sedimenttransportraten, ständig wechselnde Sedimentation und Erosion und regelmäßig auftretende Wassertrübung adaptiert ist. Es konnte im Rahmen der UVS und der naturschutzrechtlichen Konfliktbewertung belegt werden, dass die zu erwartenden Auswirkungen durch Sedimentfreisetzung auf das marine Ökosystem nicht erheblich sein werden.

## 2.2 Das Modell als quantitatives Analysewerkzeug

Modelle, wie sie auch im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung genutzt werden, sind Beispiele für *quantitative Werkzeuge zur Datenanalyse*. Im Wesentlichen sind die Modelle ausgefeilte Taschenrechner, die von den Fachleuten für klar definierte Fragestellungen angepasst und eingesetzt werden.

In der Ermittlung der Umweltauswirkungen kommen die Modellwerkzeuge in allen wesentlichen Schritten unterstützend zum Einsatz:

- Bestandsermittlung, Erhöhung der zeitlichen und räumlichen (Mess-)Datendichte
- Beschreibung, Quantifizierung und Analyse der Projektwirkungen
- Prognose der projektbedingten Umweltauswirkungen

Ein Beispiel für modellgestützte Untersuchungen ist folgende Fragenkette: 1) wie stark wird die Lichtdurchlässigkeit des Wassers in einem bestimmten Bereich durch einen definierten Sedimenteintrag reduziert? 2) hat die Lichtreduktion Auswirkungen auf die Seegrasbestände? und 3) wenn ja, welche Auswirkungen ergeben sich daraus für Seevögel, deren Nahrungsgrundlage Seegras ist? Die Modelle geben quantitative Prognosen von Auswirkungen, liefern aber keine Bewertung dieser Auswirkungen. Es bleibt Aufgabe der Fachleute, Kriterien für die Schwere einer Auswirkung zu definieren und die Bedeutung bzw. Erheblichkeit einer Auswirkung zu beurteilen.

Sowohl die Methodik der Ermittlung der Umweltauswirkungen als auch die schutzgutspezifischen Bewertungskriterien und Erheblichkeitsschwellen sind in den Planfeststellungsunterlagen und Planänderungsunterlagen ausführlich dargelegt.

Im Rahmen der Umweltuntersuchungen kamen mehr als 10 verschiedene Modelle verschiedenen Typs zum Einsatz (Anhang, Tabelle 5 gibt dazu einen Überblick). Es wurden dynamische, numerische, 2- oder 3-dimensionale Modelle (z.B. zur Prognose der Sedimentverdriftung) und statische Modelle (z.B. GAM zur Analyse von Habitaten oder Populationsgrößen bestimmter Tierarten) eingesetzt. „Dynamisch“ bedeutet, dass die zeitliche Entwicklung eines oder mehrerer Prozesse betrachtet wird. „Numerisch“ ist ein Modell, dessen zu lösende Gleichung(en) sich einer analytischen, d.h. mathematische exakten Lösung entziehen und durch (numerische) Näherungsverfahren gelöst werden müssen. Die Dimension der Modelle bezieht sich i.d.R auf die betrachteten Raumdimensionen. Auch die Zeitachse kann als eine zusätzliche Dimension angesehen werden. „Statistisch“ sind Modelle, die sich Werkzeugen der Stochastik oder Wahrscheinlichkeitstheorie bedienen. „Statische“ Modelle betrachten ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt, bzw. als Aneinanderreihung einzelner Zeitpunkte („semi-dynamisch“).

Die dynamischen, numerischen und mehrdimensionalen Modelle sind in der Lage, physikalische und biologische Systeme sowie deren Reaktion auf (äußere) Einwirkungen zu simulieren. Dabei liefern diese Modelle nicht nur quantitative sowie räumlich und zeitlich veränderliche Ergebnisse, sie können ebenfalls Rückkopplungen verschiedener Komponenten

untereinander betrachten (z.B. wie sehr eine Änderung der Planktonkonzentration die Muschelbestände beeinflusst und wann (zeitliche Auflösung) und wo (räumliche Auflösung) dies geschieht).

Die dynamischen Modelle wurden mit anerkannten, national und international etablierten Softwarepaketen erstellt, die für ihr jeweiliges Anwendungsgebiet damals wie heute den Stand der Technik darstellen. Hauptsächlich kam dabei MIKE by DHI zum Einsatz (im Folgenden MIKE). Insbesondere für die Modellierung der Hydrographie und Wasserqualität wurden – zur unabhängigen Überprüfung der Simulationsergebnisse – MOM (Institut für Ostseeforschung Warnemünde, IOW) und GETM/ERGOM (IOW und Bolding&Burchard) genutzt. Alle diese Modellsysteme wurden bereits in einer Vielzahl großer und komplexer Projekte in der Ostsee und anderswo erfolgreich angewendet (siehe Anhang, Tabelle 6).

Der Einsatz dieser hochentwickelten Modellwerkzeuge erlaubt eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Prognose der projektbedingten Umweltauswirkungen, wie sie für ein Projekt dieser Größe und Komplexität notwendig ist. Nichtsdestotrotz bleibt es Aufgabe der Fachleute und Umweltexperten mit Projekterfahrung und Systemverständnis, die Modelle mit relevanten Eingabedaten, zielführenden und angemessenen Festlegungen z.B. zu Modellgröße und Diskretisierung (räumliche und zeitliche Auflösung) zu erstellen und die Simulationsergebnisse sorgsam auszuwerten und fachgerecht zu interpretieren.

## 2.3 Simulation der Sedimentverdriftung

Die Prognose der Sedimentausbreitung im Fehmarnbelt und in angrenzenden Meeresgebieten ist ein wesentlicher Eingangsdatensatz für die Untersuchung projektbedingter Auswirkungen auf verschiedene marine Teilschutzgüter.

### Drei Teilmodelle zur Simulation der Sedimentverdriftung

Für die numerische Berechnung der Sedimentverdriftung aufgrund mariner Bauarbeiten im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung kommen drei miteinander verlinkte Teilmodelle zum Einsatz: MIKE3 FM HD (Hydrodynamik), MIKE21 FM SW (Seegang) und MIKE3 FM MT (Sedimenttransport). MIKE ist jeweils der Name des Softwarepakets, aus dem die Teilmodelle stammen, die Zahl (3 oder 21) gibt einen Hinweis auf die betrachteten räumlichen Dimensionen (wobei 21 im Falle des Seegangmodells für 2-dimensional horizontal und 1-dimensional vertikal steht). Das Kürzel am Ende steht für die betrachteten Prozesse (HydroDynamics, Spectral Waves, Mud Transport). Das hydrodynamische und das Seegangmodell simulieren die „Transport- und Mobilisierungskräfte“ (Strömung und Wellen), die für Transport, Sedimentation und Resuspension sorgen. Das Sedimenttransportmodell berechnet basierend auf diesem Input der beiden ersten Teilmodelle dann das Transportverhalten spezifischer Sedimenttypen in Abhängigkeit von den jeweiligen charakteristischen Transportparametern wie Sinkgeschwindigkeit oder kritischer Depositions- und Erosionsschubspannung. Die Sinkgeschwindigkeit gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich Partikel aufgrund der Schwerkraft in Richtung Meeresboden bewegen. Die kritische Depositionsschubspannung gibt den Wert an, bei dessen Unterschreitung sich bodennah transportierte Partikel absetzen. Wenn die Schubspannung einen bestimmten Wert überschreitet (kritische Erosionsschubspannung) gelangen die abgesetzten Partikel wieder in die Wassersäule.

Für alle drei Teilmodelle wurden die meteorologischen und hydrodynamischen Bedingungen des Jahres 2005 als Randbedingungen angesetzt. 2005 stellt ein typisches Jahr für die Fehmarnbeltregion dar, in dem sich viele einzelne charakteristische hydrographische Szenarien aneinanderreihen. Es kommen ebenso Stürme wie ruhige Wetterperioden, Ein- und Ausstromereignisse sowie ausgeprägte Dichteschichtungen des Wasserkörpers aber auch Phasen vollständiger Durchmischung vor.

Abbildung 4 zeigt den Jahresverlauf 2005 beispielhaft für Strömung, Wellen und Wind im Fehmarnbelt (Messstation MS01). Im Verlauf der Zeitreihen ist die natürliche Variabilität dieser Parameter im betrachteten Modellzeitraum zu erkennen.

# Femern Sund ≈ Bält

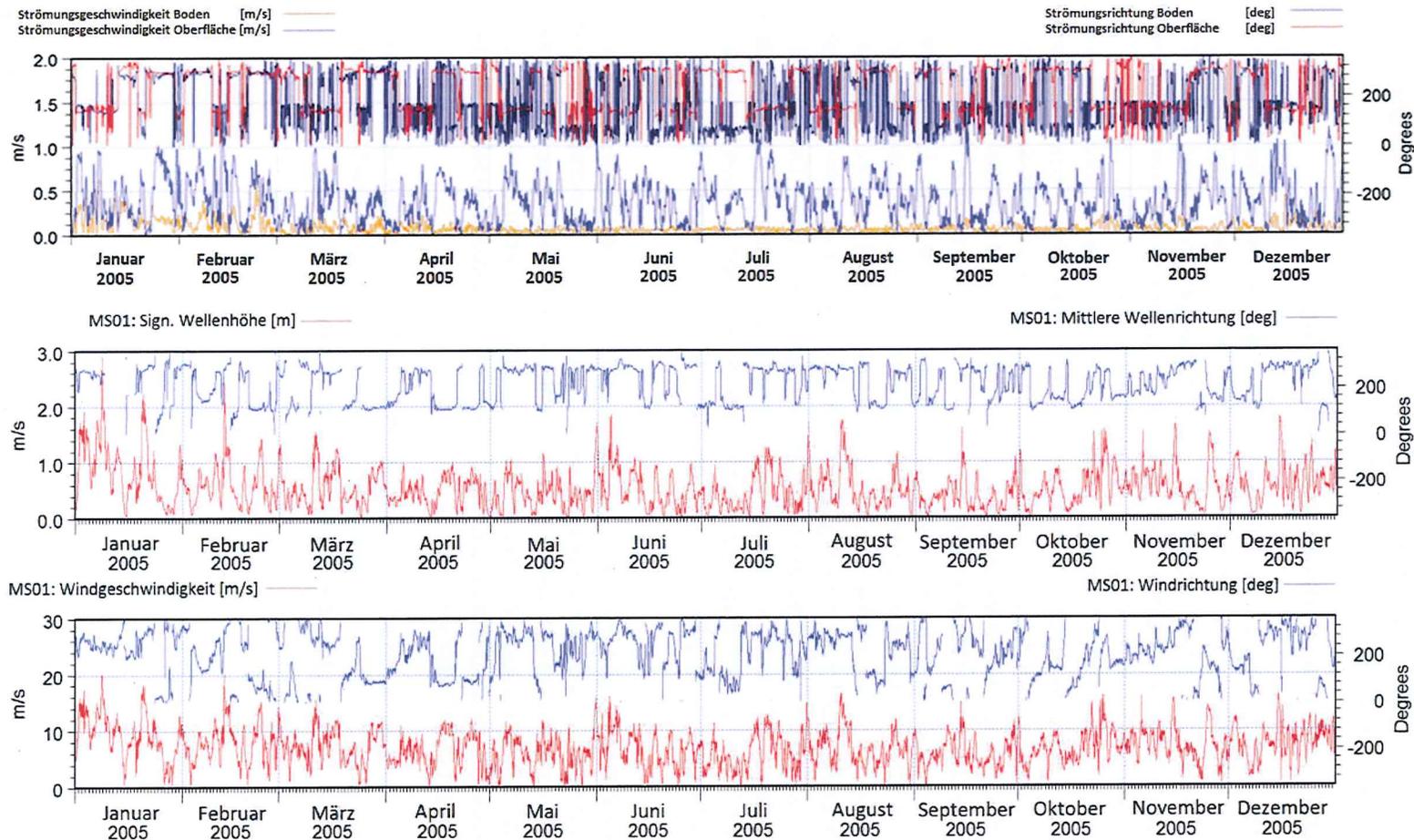


Abbildung 4: Überblick über Hydrodynamik und Windverhältnisse an Station MS01 im Jahr 2005 (vgl. FEHY (2013b))

Den Modellen liegt ein Zeitraum zugrunde, der die gesamte Bandbreite typischer Bedingungen in der Westlichen Ostsee und dem Fehmarnbelt widerspiegelt, d.h. es wird die natürliche Dynamik und Veränderlichkeit der marinen Bedingungen im Jahresverlauf vollständig erfasst. Es ist dabei weniger wichtig, dass gerade das Jahr 2005 als Modelljahr ausgewählt wurde, als dass dieses Jahr repräsentativ für die Variabilität im Untersuchungsgebiet ist.

Die Einordnung des Jahres 2005 in einen längeren Referenzzeitraum ist beispielhaft in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Es wird jeweils ein Vergleich monatlich gemittelter Parameter (Windgeschwindigkeit (Abbildung 5) und Strömungsgeschwindigkeit (Abbildung 6)) der Jahre 2005 (Kalibrierung und Grundlage der Auswertungsprognose, blaue Symbole) und 2009 (Validierung, rote Symbole) mit langjährigen Datenreihen (40 Jahre, 1970-2009) vorgenommen. Für die langjährigen Daten werden neben Monatsmittelwerten (grüne, durchgehende Linie und grüne Symbole) auch die Standardabweichungen (grüne, gestrichelte Linien) gezeigt. In Abbildung 6 ist die Strömungsgeschwindigkeit dargestellt, aufgeteilt in östliche (negatives Vorzeichen) und westliche (positives Vorzeichen) Komponente. Im Fehmarnbelt bedeutet Strömung in westliche Richtung Ausstrom aus der Ostsee in Richtung Nordsee und Strömung in östliche Richtung somit Einstrom. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass die monatlichen Werte aus 2005 in der Regel innerhalb der Standardabweichung des 40-jährigen Referenzzeitraums liegen.

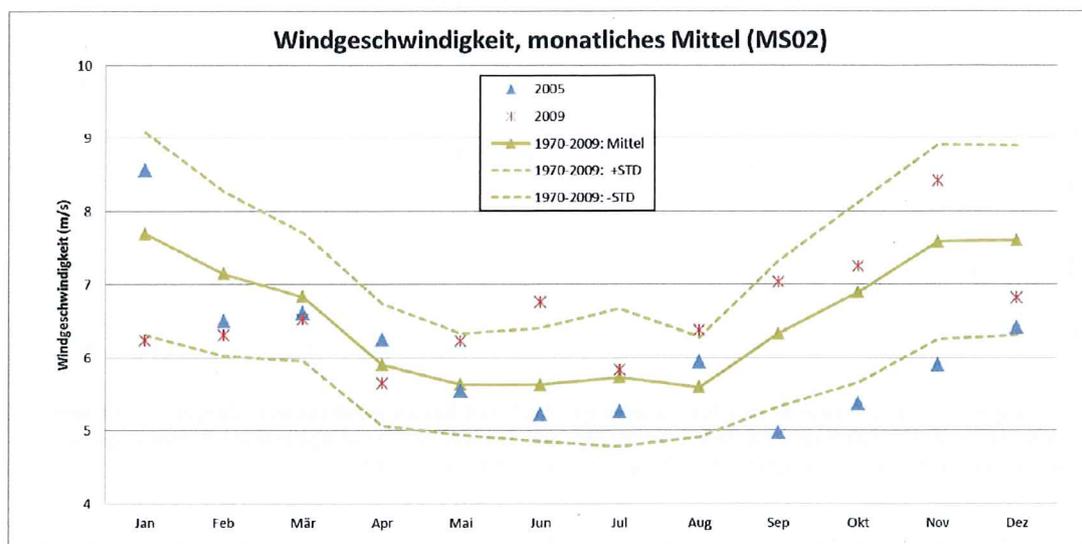
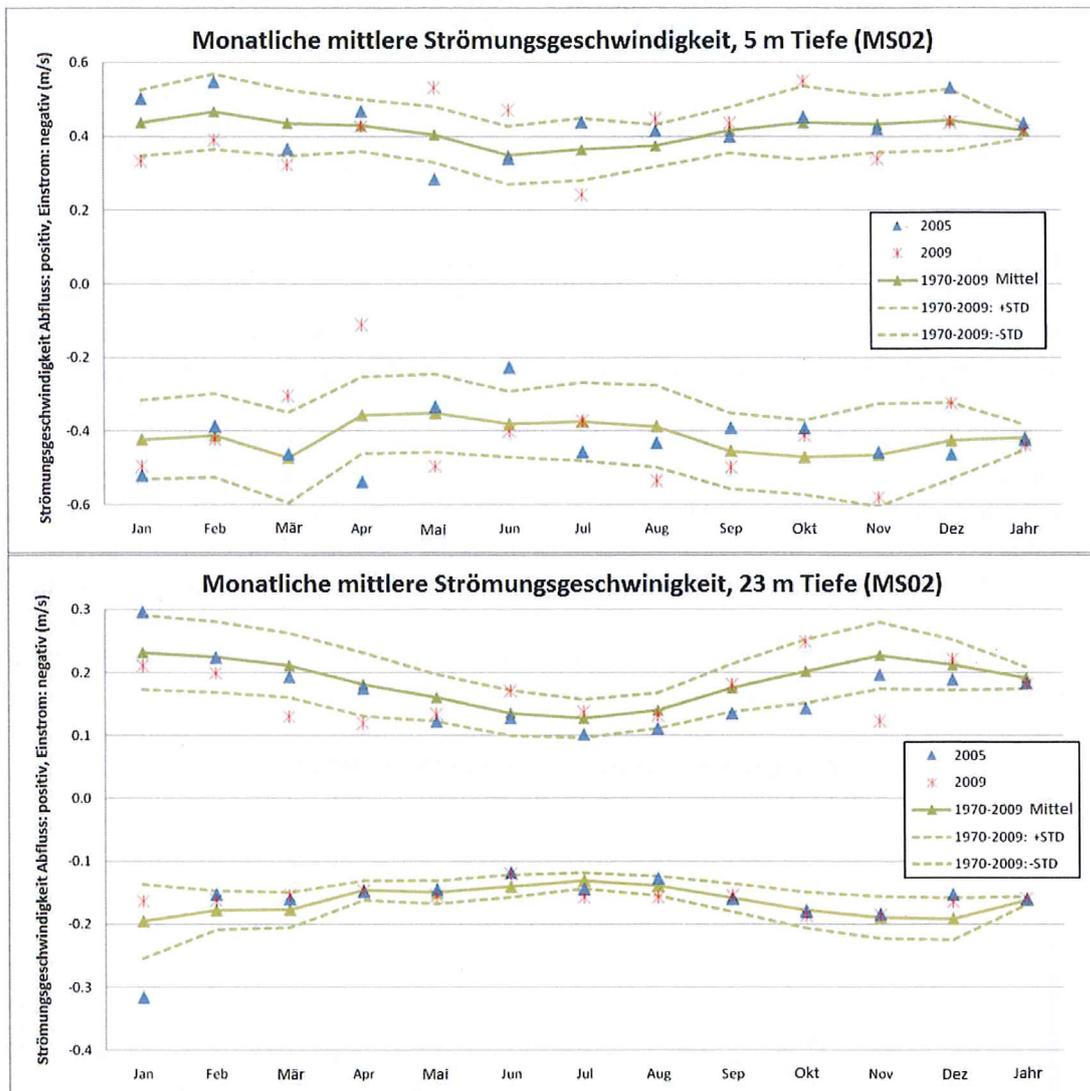


Abbildung 5: Repräsentativität des Kalibrierungs- und Validierungszeitraums, Vergleich mittlerer monatlicher Windgeschwindigkeit mit langjährigen Daten (1970-2009) (vgl. Anlage 15 Anhang A, Kap. 0.1.2.2.3.4., S. 48).



**Abbildung 6: Repräsentativität des Kalibrierungs- und Validierungszeitraums, Vergleich mittlerer monatlicher oberflächennaher Strömungsgeschwindigkeit (oben) und sohlnaher Strömungsgeschwindigkeit (unten) mit langjährigen Daten (1970-2009) (FEHY 2013c).**

Die durchgehende Betrachtung eines vollständigen Jahres hat den Vorteil, dass kontinuierlich unterschiedliche Szenarien berechnet werden konnten, ohne dass Qualitätseinbußen bei den Modellergebnissen durch die Ermittlung und Abschätzung von Anfangswerten für einzelne Szenarien auftreten können.

In anderen deutschen Projekten, die mit dem Thema Sedimentfreisetzung umgehen mussten, wurde oft ein anderer Ansatz gewählt. Statt mit einem vollständigen Jahreslauf für die Auswirkungsprognose zu rechnen, wurden repräsentative kurze Einzelzustände (Szenarien) ausgewählt und die Ergebnisse dann auf die gesamte Freisetzungszeit oder Bauzeit

extrapoliert (z.B. Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt (Elbvertiefung)).

Im Zusammenspiel verfolgen die drei Teilmodelle das gesamte während der Bauarbeiten projektbedingt frei gesetzte Sediment. Ausgehend von dem jeweiligen Ort und der spezifischen Zeit der Freisetzung wird die Ausbreitung von Modellzelle zu Modellzelle und Zeitschritt zu Zeitschritt berechnet. Die Sedimente können sich in Phasen geringer Strömungsgeschwindigkeit in den Modellzellen „absetzen“ und bei zunehmender Energie (Strömung) im Wasser wieder „aufgewirbelt“ werden.

### **Fünf Sedimentfraktionen abgeleitet aus Felduntersuchungen und Labortests**

Im Teilmodell zum Sedimenttransport (MIKE 3 MT) wird das bei den marinen Bauarbeiten frei gesetzte Sediment beschrieben. Insbesondere bei Freisetzung von Sedimenten aus natürlich gewachsenen Böden wäre es unpraktisch, jede vorkommende Bodenart mitsamt ihrer spezifischen Korngrößenverteilung und der damit einhergehenden Spanne von Transportparametern (Sinkgeschwindigkeit, etc.) einzeln im Modell abzubilden. Stattdessen wird im Modell eine Anzahl von charakteristischen Modellfraktionen unterschiedlicher Korngrößen definiert. Die Modellfraktionen decken das gesamte projektspezifische Korngrößenspektrum ab und können daher je nach Zusammensetzung alle angetroffenen Bodenarten repräsentieren. Schluffige Böden werden im Modell z.B. sowohl mit einem Anteil der grobkörnigen Modellfraktionen als auch einem feinkörnigen Anteil abgebildet, während Tone durch wenig bis keinen groben Anteil, dafür jedoch fast ausschließlich durch fein- und feinstkörnige Modellfraktionen repräsentiert werden. Dieser Ansatz stellt sicher, dass jede Bodenart im Transportmodell durch ihre charakteristische Korngrößenverteilung und die daraus resultierende Spannbreite von Transportparametern abgebildet wird.

Der Untergrund im Fehmarnbelt besteht entlang der geplanten Tunneltrasse aus mehreren verschiedenen Bodenarten. Jede Bodenart hat eine charakteristische Korngrößenverteilung, die durch Bohrkernentnahmen entlang der Trasse im Labor ermittelt wurde (Lokationen der Bohrkernentnahme im Fehmarnbelt: Abbildung 7). Jede Bohrung reicht ca. 50 bis 100 m in den Untergrund. Insgesamt wurden 45 Proben aus jeder Sedimentschicht entnommen. Für jede der Proben wurde die Korngrößenverteilung bestimmt. Ein Ergebnis für die Lokation A003, 50 cm Tiefe ist in Abbildung 8 dargestellt (weitere Ergebnisse finden sich in FEHY 2013b, Anhang D).

Die feinen Sedimente (Schluff, Ton) haben niedrige Sinkgeschwindigkeiten, verbleiben nach Freisetzung daher längere Zeit in Schwebelage und setzen sich erst ab, wenn die Strömungsgeschwindigkeit (oder genauer: die kritische Schubspannung für Deposition) einen bestimmten Wert unterschreitet. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit (bzw. wird die kritische Schubspannung für Erosion überschritten), gehen diese Sedimente wieder in die Wassersäule über, sie werden resuspendiert. Die gröberen Sedimente (Sande) haben höhere Sinkgeschwindigkeiten, sie setzen sich größtenteils im oder nahe des Freisetzungsbereichs ab. Der abgelagerte Sand wird am Meeresboden Teil der dynamischen sandigen Sohlformen unterschiedlicher Größen und hat in der freigesetzten Menge keine negativen Auswirkungen auf die vorhandenen Meeresbodenverhältnisse.

Um alle angetroffenen Bodenarten im Modell repräsentieren zu können, wurden fünf Fraktionen mit unterschiedlichen spezifischen Eigenschaften definiert, jede dieser Fraktionen repräsentiert eine bestimmte Korngrößenklasse. Durch unterschiedliche Kombination der fünf Fraktionen können nun alle entlang der Tunneltrasse angetroffenen Bodenarten im Modell abgebildet werden. Im Sedimenttransportmodell werden die vier feineren Fraktionen betrachtet. Die fünfte, grobe Fraktion (Sand) setzt sich im direkten Nahbereich der Freisetzung ab und ist für die weitere Verdriftungsmodellierung nicht von Bedeutung. Die Sedimentation der Sandfraktion wird als Projektwirkung in der Auswirkungsprognose berücksichtigt.

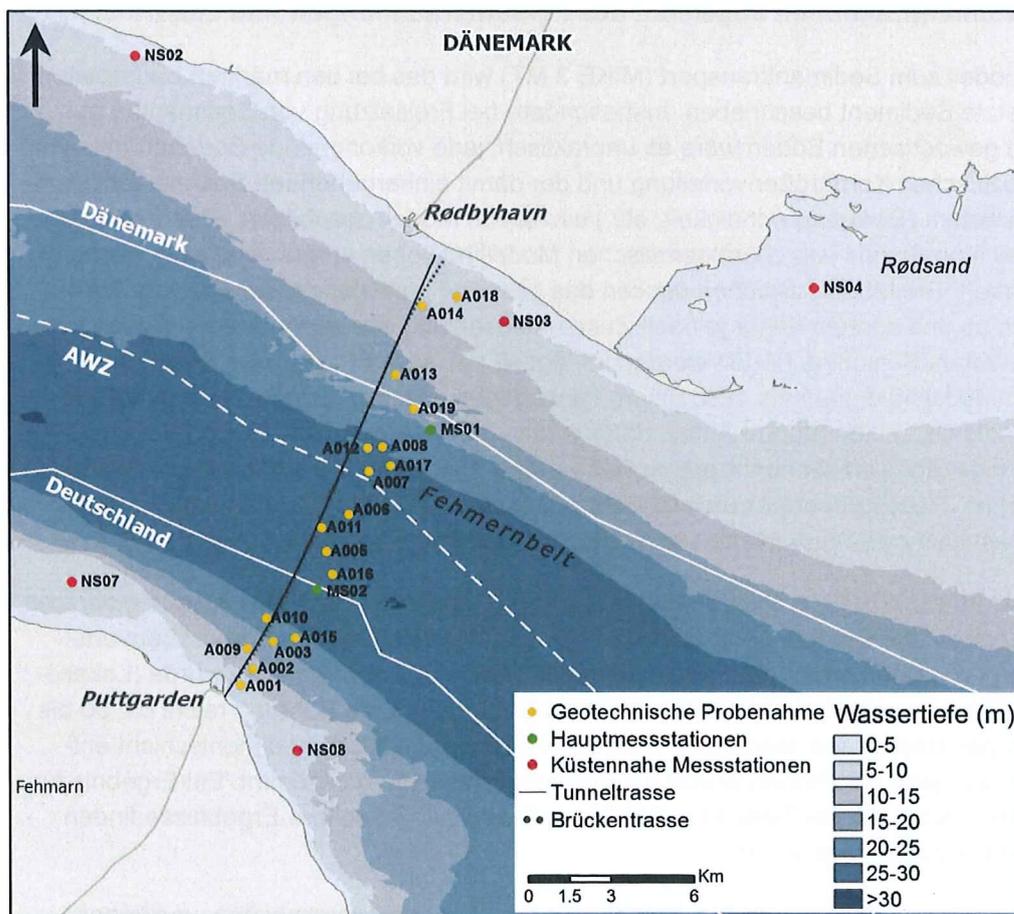


Abbildung 7: Lage der geotechnischen Meeresbodenerkundungen (Sedimentkernentnahmen) (vgl. Anlage 15 Anhang B Methodik, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 811 und FEHY (2013b))

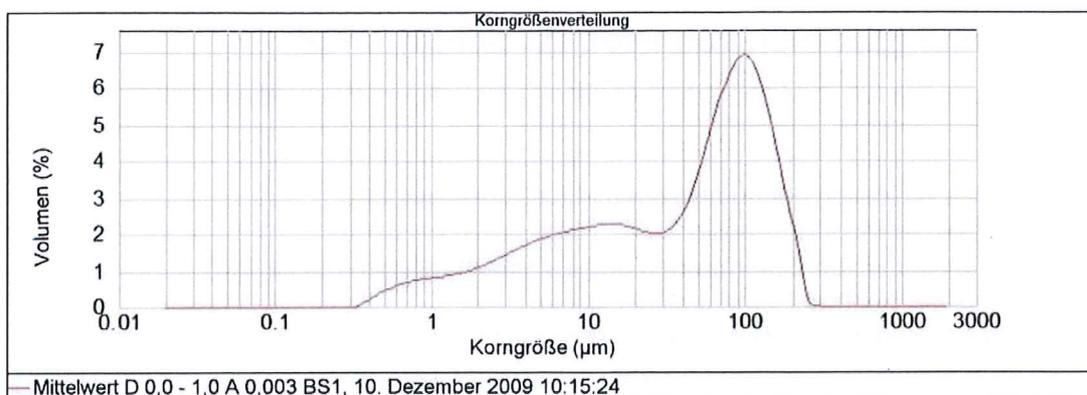


Abbildung 8: Korngrößenverteilung für die Probenummer 2 (A003 BS1) 50 cm unter Meeresboden. Postglazialer Sand (Ton < 0,002 mm, Schluff < 0,002mm-0,063 mm, Sand >0,063 mm) (vgl. Anlage 15 Anhang B Methodik, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 811 und FEHY (2013b) Anhang D)

Jede Fraktion im Transportmodell wird durch ihre Sinkgeschwindigkeit sowie die kritischen Schubspannungen für Deposition und Erosion definiert. Die Sinkgeschwindigkeiten wurden in umfangreichen Versuchen mit Standortmaterial bestimmt, die Schubspannungen stammen aus Erfahrungswerten ähnlicher Standorte und Projekte und stimmen mit Literaturwerten überein.

DHI hat jahrzehntelange Erfahrung in den Bereichen Modellierung und Monitoring von Sedimenttransport. Das gewählte Vorgehen bzgl. der Repräsentation der Bodenarten und der Parametrisierung der Modellfraktionen wird von DHI in vielen vergleichbaren Projekten weltweit eingesetzt (siehe Anhang, Tabelle 6) und damals wie heute als Stand der Technik angesehen.

Die Vorgehensweise entspricht ebenfalls der in vergleichbaren deutschen Projekten wie den Betrachtungen zum Bau der Kühlwasserleitung des GdF Suez Kraftwerkes in Wilhelmshaven (DHI) oder der Elbvertiefung (BAW).

### **3. Stellungnahmen von Prof. Dr. Schüttrumpf**

Die Ausführungen von Prof. Dr. Schüttrumpf beziehen sich im Wesentlichen auf folgende Themen:

- Räumliche Auflösung der numerischen Modelle (Kapitel 3.1)
- Verifikation der Modelle (Kapitel 3.2)
- Berücksichtigung von Extremwerten und Extremsturmfluten (Kapitel 3.3)
- Nachweis der Hochwasserneutralität (Kapitel 3.4)
- Regenerationszeit des Meeresbodens (Kapitel 3.5)
- Berücksichtigung von deutschen Daten, Unterlagen, Dokumenten, Regelwerken, Gesetzen und Generalplänen (Kapitel 3.6)
- Modell zur Badegewässerqualität (Kapitel 3.7)
- Kalibrierung des Modells zur Sedimentverdriftung (Kapitel 3.8)
- Kumulative Betrachtung von projektbürtigem und natürlichem Sediment (Kapitel 3.9)

Prof. Dr. Schüttrumpf formuliert in seinem Vortrag vom 29.06.2017 fünf Anträge:

- Alle Untersuchungen zur Hydrodynamik, zum Sedimenttransport, zur Sedimentverdriftung, zur Wasserqualität und zur Biologie sind mit einem Modell der Ostsee inkl. eines hochaufgelösten Tunnelgrabens durchzuführen, um die lokalen und großräumigen Auswirkungen zu prognostizieren. (Kapitel 3.1)
- Der Nachweis der Hochwasserneutralität ist für Bemessungswasserstände durchzuführen. (Kapitel 3.4)
- Die Wiederverfüllungsraten sind auf der Grundlage eines Testfeldes abzuleiten, das in Position und Abmessung dem künftigen Tunnelgraben entspricht. (Kapitel 3.5)
- Es sind hydronumerische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Sedimentverdriftung auf der Grundlage eines kalibrierten Modells inkl. eines Tunnelgrabens durchzuführen, alle Ergebnisse sind darzustellen und zu bewerten. (Kapitel 3.8)
- Alle Ergebnisse sind nachvollziehbar darzustellen.

Die Kritik und Ausführungen sind ungeeignet, die Qualität der verwendeten Modelle in Frage zu stellen und daraus Mängel bei der Prognose der vorhabenbedingten Umweltauswirkungen abzuleiten. Die Abschätzungen der vorhabenbedingten Umweltauswirkungen erfüllen die Anforderungen der Rechtsprechung an eine einwandfreie und belastbare Methode (vgl. u.a. BVerwG, Urteil vom 9.2.2017, 7 A 2/15, Juris Rn. 40 ff. Rn 60 m.w.N.). Die Vorhabenträger haben die Prognosen mit Hilfe der eingesetzten Modelle einwandfrei erarbeitet; sie beruhen insbesondere auf realistischen Annahmen. Die Vorhabenträger legen Wert auf die Feststellung, dass die Fachgutachter ausgewiesene Experten sind, die über eine umfassende Kompetenz und jahrzehntelange Erfahrung mit der numerischen Modellierung und Messdatenerfassung im Meeressystem Ostsee verfügen. Die eingesetzte MIKE-Software wurde und wird in einer Vielzahl von Projekten und Forschungsvorhaben erfolgreich eingesetzt (siehe Referenzen DHI im Anhang, Tabelle 6).

Die Prognose der Umweltauswirkungen umfasst neben den Ergebnissen der Modellierung zu den Projektwirkungen Schwebstoffe und Sedimentation die fachwissenschaftliche Interpretation auf der Grundlage von jeweils spezialisiertem Expertenwissen. Die Vorhabenträger und die beauftragten Experten haben sich für eine Prognose und Bewertung der Umweltauswirkungen, u. a. verursacht von den Projektwirkungen Schwebstoffe und Sedimentation, umfangreiche Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet Westliche Ostsee und Fehmarnbelt angeeignet. Auf der Grundlage der revier- und methodenspezifischen Erfahrungen der Gutachter wurden die Ergebnisse der Modellierungen eingeordnet und bewertet.

Nachfolgend wird zu den einzelnen Kritikpunkten im Detail Stellung genommen.

## 3.1 Räumliche Auflösung der numerischen Modelle

### Modellauflösung und Berücksichtigung Tunnelgraben

*„In Anlage 30.3 sowie der UVS Anlage 15 Anhang C wird von Femern AS Stellung zur Modellauflösung genommen. Es wird mit unterschiedlichen Modellen unterschiedlicher Auflösung gearbeitet. Es kann festgestellt werden, dass mit Ausnahme eines einfachen Detailmodells des Tunnelgrabens, das den Tunnel nicht über seine volle Länge erfasst, mit Auflösungen gearbeitet wird, die nicht geeignet sind, den Tunnel während des Bauzustands und nach Bauende hydraulisch abzubilden. Damit können Auswirkungen des Tunnels auf die Hydrografie, den Sedimenttransport sowie die Wasserqualität mit den verwendeten Modellen weder für den Bauzustand noch nach Ende des Bauzustands prognostiziert werden.“*

### Zusammenfassung der Stellungnahme

Die Kritik, dass die eingesetzten Modelle nicht mit Auflösungen arbeiten, die es ermöglichen, den Tunnel während des Bauzustands (offener Tunnelgraben) und nach Bauende hydraulisch abzubilden, ist unberechtigt. Der offene Tunnelgraben als Bauwerksstruktur wird sich weder während der Bauphase noch nach Abschluss der Bauarbeiten auf die Hydrografie, den Sedimenttransport oder die Wasserqualität auswirken. Die Auflösung des Modells ist daher nicht zu beanstanden.

### Stellungnahme

Der abschnittsweise offene Tunnelgraben während der Bauphase wird nicht im hydrodynamischen Modell zur Sedimentverdriftung abgebildet, da die Auswirkungen des Grabens auf die Strömung außerhalb des Grabens als unwesentlich eingestuft werden.

Um eine belastbare Prognose der projektbedingten Sedimentausbreitung erstellen zu können, müssen die zugrunde liegenden Modelle die maßgeblichen Prozesse und physikalischen Eigenschaften des betrachteten Modellgebiets angemessen berücksichtigen und naturnah abbilden. Neben den sedimentspezifischen Eigenschaften ist die Strömung maßgeblich für die Ausbreitung der Sedimente. Die Strömung in der Westlichen Ostsee (und damit auch im Fehmarnbelt) wird durch folgende Faktoren bestimmt (vgl. Bestandsbeschreibung, UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band II A, Kapitel 3.2.3.1.):

- regionale meteorologische Bedingungen
- hydrografische „Randbedingungen“: Süßwasserzufluss in die Ostsee einerseits (i.W. aus Flüssen) und Zustrom dichten, salzhaltigen Wassers aus der Nordsee andererseits.
- Bathymetrie: Küstenlinien, Rinnen und Schwellen

Die Strömungen im Fehmarnbelt und der Westlichen Ostsee werden in dem lokalen Fehmarnbeltmodell MIKE 3 HD simuliert.

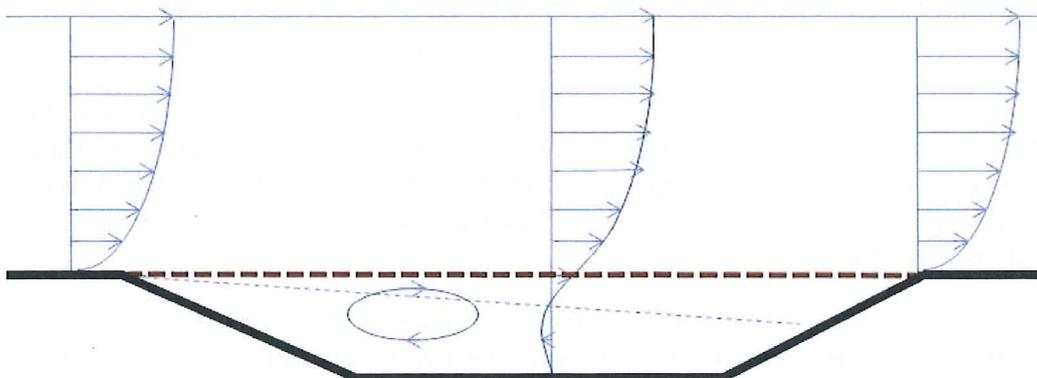
Das Modell bildet diese Prozesse und Eigenschaften des Untersuchungsgebiets naturnah ab, dies zeigt sich in der erfolgreichen Kalibrierung und Validierung mit Naturmessungen. Dies ist u.a. an der Berechnung der Salzgehaltsverteilung im Fehmarnbelt zu erkennen

(Kap. 3.2, Abbildung 15). In den Sommermonaten zeigt das Modell in guter Übereinstimmung mit den Messwerten eine ausgeprägte Schichtung im Wasserkörper: salzhaltiges, dichtes Wasser in Bodennähe (20-28 PSU) wird von geringer salzigem Brackwasser überlagert (oberflächennah 10-19 PSU). Sobald in den Wintermonaten durch Stürme eine stärkere Durchmischung der Wasserschichten eintritt gleicht sich der Salzgehalt an, die klare Schichtung im Wasserkörper ist zeitweise aufgehoben. Ohne eine naturnahe Nachbildung der Strömungen im Fehmarnbelt könnten sich die typischen Salzgehaltsverteilungen im Fehmarnbelt im Modell nicht einstellen.

Im Vergleich zu den die Transportprozesse im Fehmarnbelt und den angrenzenden Meeresgebieten bestimmenden Mechanismen sind die Auswirkungen von Bauwerksstrukturen des Absenktunnels auf die Strömung vernachlässigbar klein. Diese Bauwerkstrukturen rufen nur geringe und lokal begrenzte Änderungen der Strömung hervor. Dies zeigt sich zum einen in den projektbedingten Auswirkungen auf das Teilschutzschutzgut Hydrografie: Die Änderung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Bauwerksumfeld fällt innerhalb weniger Hundert Meter Entfernung auf unter 1 cm/s (vgl. UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band IV B, Kapitel 8.3.2.1., Seite 2693 ff.). Die Strömungsprofile im An- und Abstrom sind nahezu identisch während die Strömung im Graben deutlich reduziert ist:

Das hydrodynamische Modell bildet den ursprünglichen Meeresboden entlang der Tunneltrasse ab. Dieser Zustand entspricht dem Moment des Baubeginns. Mit fortschreitender Bauzeit weicht der Ansatz von der Realität ab, jedoch wird sich die Strömung außerhalb des Grabens nur geringfügig von einem Zustand ohne Graben unterscheiden. In Abbildung 9 ist dies prinzipiell veranschaulicht: die im Bild von links nach rechts verlaufende Strömung (symbolisiert durch blaue Pfeile und einhüllende blaue Linien) streicht über den Tunnelgraben, die Strömungsprofile im An- und Abstrom des Grabens sind nahezu identisch. Der Meeresboden mit Graben wird durch die dicke schwarze Linie dargestellt. Die braune gestrichelte Linie markiert den ursprünglichen Meeresboden vor Aushub des Grabens. Im Bereich des Grabens reicht das Strömungsprofil ein Stück weit in den Graben und es kann sich in tiefen Bereichen eine Gegenströmung ausbilden (nach links gerichtete Strömungspfeile im Graben und angedeutete Strömungswalze). Generell ist die Strömung im Graben jedoch wesentlich schwächer als außerhalb. Die dünne blau gestrichelte Linie im Graben deutet den Verlauf des vormals am Meeresboden befindlichen Nullpunktes des Strömungsprofils an. Mit zunehmender Breite des Grabens verlagert sich dieser Punkt weiter nach unten in Richtung des Grabenbodens.

Im Tunnelgraben wird sich salzhaltiges Wasser aufgrund dessen höherer Dichte sammeln. Dieses dichtere Wasser wirkt wie eine „Schmierschicht“ für die über den offenen Graben streichende Strömung. Die Situation ist vergleichbar mit den regelmäßig im Fehmarnbelt auftretenden Dichteschichtungen, wobei salzhaltiges Wasser bodennah in die Ostsee und leichteres, salzärmeres Wasser oberflächennah entgegengesetzt Richtung Nordsee strömt. Auch hier fungiert die durch einen steilen Salz-Konzentrationsgradienten gekennzeichnete Grenzschicht wie eine Schmierschicht.



**Abbildung 9: Prinzipskizze der Überströmung des offenen Tunnelgrabens in der Bauphase. Die Strömungsprofile im An- und Abstrom sind nahezu identisch während die Strömung im Graben deutlich reduziert ist.**

Eine vernachlässigbar geringe Auswirkung auf die Strömung lässt sich auch im Detailmodell des offenen Tunnelgrabens erkennen: In Abbildung 10 wird der Einfluss des offenen Grabens auf das Strömungsprofil dargestellt. Die farbigen Kurven stellen die Strömungsprofile stromab der Tunneltrasse dar. Gelb (ohne Graben) und darunter liegend Grau (mit Graben) bilden eine Situation mit geringer Strömungsgeschwindigkeit ab (im Mittel 0,15 m/s), Orange (ohne Graben und darunter liegend Blau (mit Graben) zeigen das Verhalten bei hoher Strömungsgeschwindigkeit (im Mittel 0,5 m/s). Bereits 1 km im Abstrom des offenen Grabens zeigt sich bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten nahezu keine Auswirkung auf das Strömungsprofil (linke Grafik, Änderung unter 1 %), nach 2 km sind auch für höhere Geschwindigkeiten keine Abweichungen über 1 % mehr fest zu stellen (rechte Grafik).

Die Auswirkungen der Bauwerksteile auf die Strömungsgeschwindigkeit sind im Vergleich zur natürlichen Variabilität der Strömung im Fehmarnbælt nicht erheblich. Sohl nah beträgt die Standardabweichung in den Strömungsmessungen an den festen Messstationen im Bælt ca. 13 cm/s, an der Oberfläche liegt dieser Wert bei 23 cm/s. Die Änderung durch den Tunnelgraben beträgt bodennah wenige Millimeter pro Sekunde während oberflächennah für hohe Geschwindigkeiten in 1 km Entfernung ca. 1 cm/s Differenz auftreten kann. Für niedrigere Geschwindigkeiten und weiter vom Graben entfernt liegt die Änderung auch oberflächennah deutlich unter 1 cm/s.

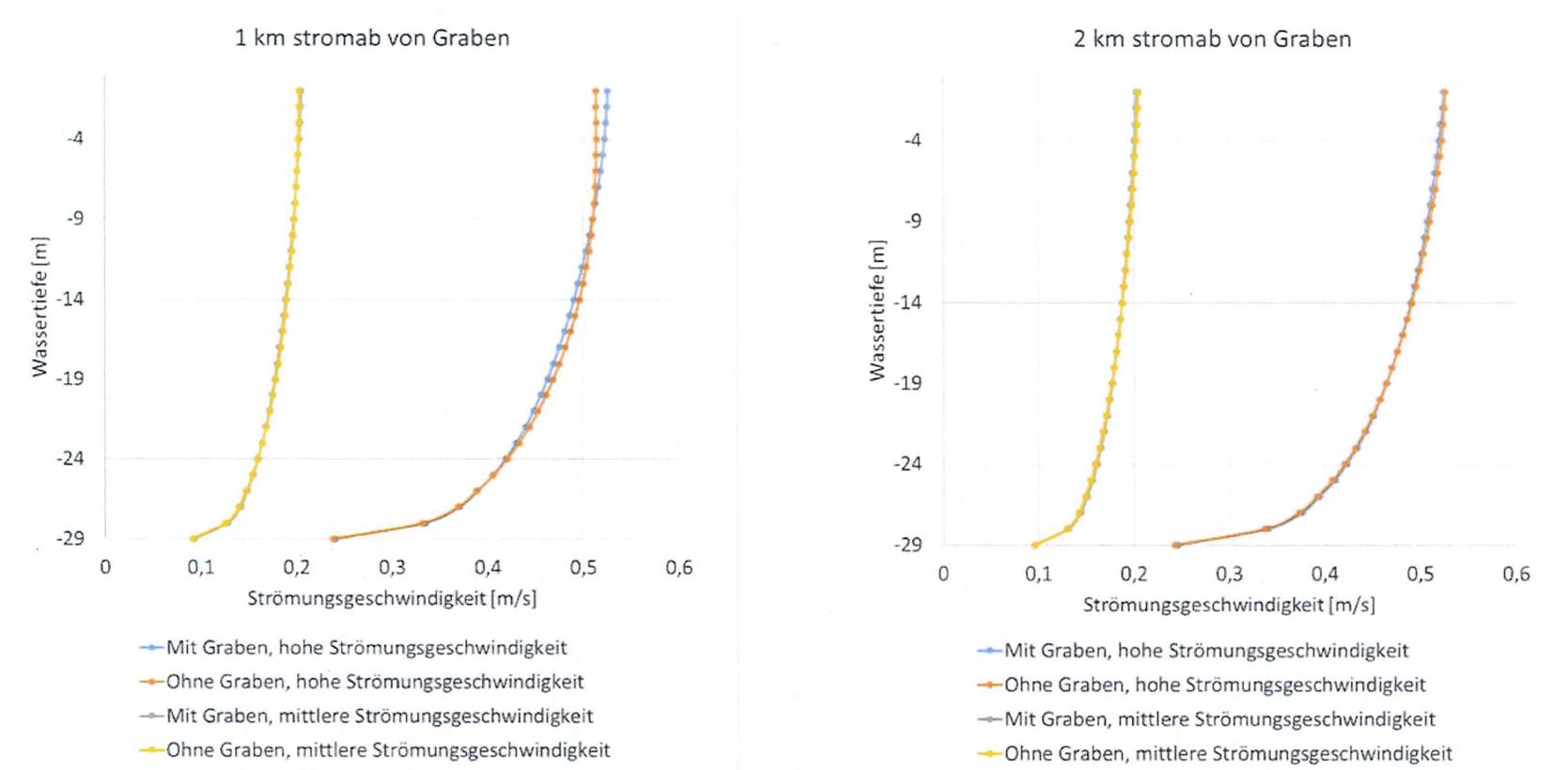


Abbildung 10: Geschwindigkeitsprofil 1 km (links) und 2km (rechts) stromabwärts vom Graben

Da die Strömung im Fehmarnbelt und in den angrenzenden Meeresgebieten durch die Bauwerksteile des Absenktunnels nicht wesentlich beeinflusst wird (und das sedimentspezifische Verhalten des freigesetzten Materials nicht ändert), ist ebenfalls keine Auswirkung der Bauwerksteile auf die Sedimentverdriftung zu erwarten, die das Ergebnis der Auswirkungsprognose für ein oder mehrere Teilschutzgüter verändern könnte.

Dies gilt analog für die Wasserqualität außerhalb und im direkten Umfeld des Tunnelgrabens. Für die Betrachtung der Prozesse im Tunnelgraben und seinem direkten Umfeld wurde ein Detailmodell erstellt. Dieses Detailmodell wird im folgenden Abschnitt dieses Kapitels ("Ersatzmodell Tunnelgraben") besprochen.

In seiner Kritik zur räumlichen Modellauflösung stellt Prof. Dr. Schüttrumpf insbesondere auf die Nichtberücksichtigung des Tunnelgrabens in den Strömungsmodellen der Westlichen Ostsee während und nach der Bauphase ab. Die generelle Eignung der gewählten Auflösung im Modell (vgl. Tabelle 10, aus UVS, Anlage 15 der Planänderungsunterlagen, Anhang C, Seite 91 – hier dargestellt in Abbildung 11) ist damit nicht in Frage gestellt.

**Tabelle 10 Zusammenfassung der horizontalen Modellauflösungen im Trassenbereich für die unterschiedlichen verwendeten hydrodynamischen 3D-Modelle.**

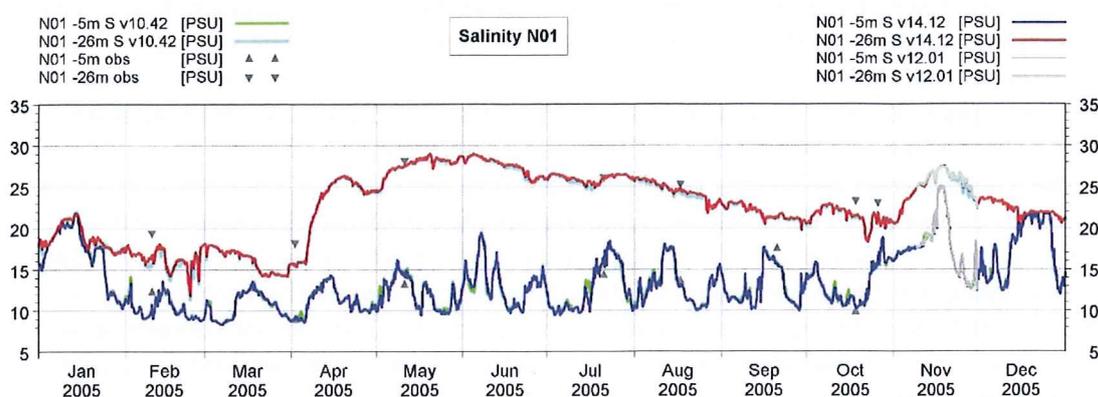
	Brücke	Tunnel
<b>Dauerhafte Auswirkungen</b>		
Ostsee-Modell (regionaler Maßstab)	3000 m/6000 m	-
Westliche Ostsee-Modell (lokaler Maßstab)	700m /400 m	100 m (30 m)
<b>Temporäre Auswirkungen (nur relevant im lokalen Maßstab)</b>		
Sedimentfreisetzung	100 m	100 m
Arbeitshäfen	-	100 m
Im Tunnelgraben	-	5 m

**Abbildung 11: Zusammenfassung der horizontalen Modellauflösungen im Trassenbereich für die unterschiedlichen verwendeten hydrodynamischen 3D-Modelle.**

Die Längenangabe (z.B. 30, 100 oder 700 m) gibt die durchschnittliche Seitenlänge der Bereiche des Rechengitters mit der feinsten Auflösung an. Diese feinste Auflösung findet sich im Umfeld der Bauwerksstrukturen.

Es wurde geprüft, ob eine Erhöhung der räumlichen Auflösung das Modellergebnis beeinflusst und ggf. die Naturähnlichkeit der Modelle verbessert. Die Längenangabe (z.B. 30, 100 oder 700 m) gibt die durchschnittliche Seitenlänge der Bereiche des Rechengitters mit der feinsten Auflösung im Modellgebiet an. Dazu wurde für das lokale Modell zur Auswirkungsprognose des Absenktunnels eine Version mit 30 m Auflösung erstellt und dessen Ergebnisse mit denen der gröber aufgelösten Modellversionen verglichen. Das 30 m Modell wurde für einen repräsentativen Zeitraum im Jahr 2005 gerechnet (3 Wochen im November). Wenn die Modelle in diesem Zeitraum eine Übereinstimmung der Ergebnisse zeigen, ist dies auch für das gesamte Jahr zu erwarten. Abbildung 12 zeigt Zeitreihen des Salzgehalts an der Station N01 im Fehmarnbelt für das Jahr 2005 (boden- und oberflächennah). Dreiecke symbolisieren Messdaten, farbige Kurven Modellergebnisse. Zusätzlich zu den

beschriebenen Tunnelmodellen ist in dem Vergleich das mit ca. 700 m deutlich gröber aufgelöste lokale Modelle der Brücke enthalten: Brücke 700 m (v10.42, hellgrüne und hellblaue Linie), Tunnel 100 m (v14.02, rote und blaue Linie) und Tunnel 30 m (v12.01, hell- und dunkelgraue Linien, nur November). Die Zeitreihen zeigen die Übereinstimmung der Ergebnisse für den Salzgehalt: die Kurven der oberflächennahen Modellergebnisse (rot, hellblau, hellgrau) und die der bodennahen Modellergebnisse (blau, hellgrün und dunkelgrau) sind nahezu deckungsgleich. Der Salzgehalt ist wiederum ein guter Indikator für die Übereinstimmung der Strömung in den Modellen, da Unterschiede im Strömungsfeld zu einer unterschiedlichen Verteilung der verschiedenen salzigen Wassermassen führen würden.



**Abbildung 12: Simulierte und gemessene Salzgehalte an der Station N01 (oberflächen- und bodennah). Die verschiedenen Modellergebnisse basieren auf unterschiedlich hoch aufgelösten Rechenetzen im Fehmarnbelt; v10.42: Brückenszenario, ca. 700 m; v14.12: Tunnelszenario 100 m; v12.01: Tunnelszenario 30 m (nur November). Einheit der Y-Achsen [PSU].**

### Ersatzmodell Tunnelgraben

*„Ersatzmodelle zur Abbildung des Tunnels sind ebenfalls ungeeignet, da hier die Hydraulik dem Modell aufgezwungen wird und sich nicht im Modell einstellen kann. Somit ist das Ergebnis der Simulationsergebnisse ein direktes Ergebnis der Modellsteuerung.“*

Das Detailmodell für den Tunnelgraben wurde erstellt, um die Auswirkung des Tunnelgrabens auf die Wasserqualität und Hydrografie im Graben selbst und seinem direkten Umfeld zu untersuchen. Das Detailmodell bildet die Geometrie des offenen Tunnelgrabens durch eine hohe räumliche Auflösung von 5 m ab. Ebenso wird die natürliche Variabilität der Strömung im Fehmarnbelt durch den Ansatz des gesamten Untersuchungsjahres 2005 als hydraulische Randbedingung berücksichtigt. Die Vereinfachung der Geometrie des Detailmodells für den Tunnelgraben auf einen schmalen „Riegel“ senkrecht zur Tunneltrasse (vgl. Anlage 30.3 der Planänderungsunterlagen, Kapitel 3.3, S. 7) ist gerechtfertigt, da die Strömung im Fehmarnbelt im Wesentlichen ebenfalls senkrecht zur Trasse verläuft. Das Detailmodell für den Tunnelgraben ist sozusagen ein Ausschnitt aus dem vollständigen lokalen 3D-Modell der Westlichen Ostsee.

Die Hydraulik des Modells wird an dem (Einstrom-)Modellrand fest vorgegeben. Innerhalb des Modellgebiets im Graben und in dessen Umfeld, stellt sich das Strömungsgeschehen

jedoch gemäß der ‚vorgefundenen‘ Strukturen ein, d.h. die Strömung reagiert frei auf geometrische Strukturen wie den offenen Graben.

Zur direkten Abbildung einer Durchflussänderung durch den Fehmarnbelt ist ein solches Detailmodell nicht geeignet, dies ist aber auch nicht Ziel des Modells.

Sehr wohl können in dem Grabenmodell jedoch Aussagen zu Auswirkungen auf das Strömungsgeschehen (im Graben und im Abstrom) gemacht werden. Damit sind ebenfalls indirekte Aussagen zum Durchfluss möglich. Eine Durchflussänderung kann nur durch einen erhöhten Fließwiderstand im Fehmarnbelt erzeugt werden, hervorgerufen etwa durch Verengung des hydraulischen Querschnitts durch Bauwerksteile. Dementsprechend ist der Einfluss der in den Fließquerschnitt reichenden Bauwerksteile (Hafenanlagen, küstennahe Schutzabdeckungen) auf den Wasseraustausch durch den Fehmarnbelt im Modell untersucht und quantifiziert worden (Reduktion um 0,01 %, UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band IV B, Kapitel, 8.3.2.1, Tabelle 8-76, S. 2698). Der Tunnelgraben stellt zu keiner Zeit eine Verengung des Fließquerschnitts dar.

Da der Tunnelgraben als Struktur den Fließquerschnitt nicht verengt, kann der Durchfluss nur durch ‚indirekten‘ Einfluss auf die Strömung beeinflusst werden: theoretisch können Verwirbelungen im Graben und an dessen Rändern entstehen, die wiederum den Fließwiderstand erhöhen. Diese Turbulenzen hätten dann auch eine deutliche Veränderung des Strömungsbildes im Abstrom des Grabens zur Folge, die im Grabenmodell erkennbar werden müsste. Im Modell werden jedoch keine derartigen Änderungen des Strömungsprofils beobachtet (Abbildung 10).

Die Argumente für den offenen Tunnelgraben gelten erst recht für die nach Bauende verbleibende flache Vertiefung: diese stellt auch bis zum Zeitpunkt des Abschlusses der (natürlichen) Wiederverfüllung weder eine Verengung des Fließquerschnittes noch eine Quelle für sonstige relevante Fließwiderstände dar.

## **Simulationssoftware und Vergleichsmodelle**

*„Scheinbar ist die MIKE-Software nicht in der Lage, den Tunnel im Modell abzubilden. Daher wird empfohlen, Vergleichsrechnungen mit international bzw. in Deutschland akzeptierten Modellverfahren wie Delft3D, TRIM3D oder UNTRIM durchzuführen. Die Mike-Produkte müssen aufgrund der nach wie vor fehlenden Detailauflösung als ungeeignet zur Beschreibung der Auswirkungen einer FFBQ auf die Hydrografie, den Sedimenttransport, die Sedimentverdriftung und die Wasserqualität angesehen werden. Es wird daher dringend empfohlen, Vergleichsrechnungen mit einer Alternativsoftware durchzuführen, wie dies auch in anderen großen Planfeststellungsverfahren in Deutschland üblich ist.“*

## **Zusammenfassung der Stellungnahme**

Die MIKE-Software ist in der Lage, den Tunnel im Bauzustand oder nach dem Ende der Bauphase in einem Modell abzubilden. Die Vorhabenträger haben aufgezeigt (vgl. Kap. 3.1), dass der Tunnel keine Auswirkungen auf die Hydrografie, die Sedimentation oder die Wasserqualität im Fehmarnbelt haben kann. Das gilt sowohl für den Tunnel im Bauzustand als auch nach dem Ende der Bauphase. Es ist demzufolge nicht erforderlich, die Modellierung so aufzustellen, dass der Tunnel abgebildet wird. Hinzu kommt, dass für die Prognose der Auswirkungen neben der MIKE-Software auch andere Systeme verwendet wurden, um die eingesetzte Modellierung zu prüfen.

## **Stellungnahme**

Das Modellsystem MIKE stellt zum Erstellungszeitpunkt der Auswirkungsprognose und auch heute den Stand der Technik dar, es ist national und international etabliert und anerkannt. MIKE Software wurde und wird in einer Vielzahl von Projekten und Forschungsvorhaben erfolgreich angewendet (siehe Referenzen DHI im Anhang, Tabelle 6 oder Forschungsprojekte der CORELAB Gruppe Küstenmodellierung der CAU Kiel (CORELAB 2008, CORELAB 2013)).

In der für die Abbildung des Grabens im zentralen Fehmarnbelt zu groben Auflösung des Rechengitters sieht Prof. Dr. Schüttrumpf einen prinzipiellen Mangel des verwendeten Modellsystems MIKE. Die Vorhabenträger haben in ihren Erwiderungen stets darauf hingewiesen, dass die Wahl der zugrunde gelegten räumlichen Modellauflösung bewusst gewählt wurde und eben nicht durch praktische Zwänge (z.B. Beschränkung des Modellsystems) bedingt ist.

Die Einwendung empfiehlt zudem „Vergleichsrechnungen mit international bzw. in Deutschland akzeptierten Modellverfahren“. Solche Vergleichsrechnungen, auch für die Betrachtung der Auswirkung einzelner Bauwerksstrukturen, sind in anderen Planfeststellungsverfahren nicht üblich und wurden auch vor Gericht nicht eingefordert (BVerwG, Vattenfall Kraftwerk Moorburg). Dessen ungeachtet wurden für die Modellierung der Hydrographie und Wasserqualität zur Bestandsbeschreibung und zur Prognose von dauerhaften Auswirkungen über die Westliche Ostsee hinaus, neben der MIKE-Software auch MOM (Institut für Ostseeforschung Warnemünde, IOW) und GETM/ERGOM (IOW und Bolding&Burch-

ard) genutzt. Die Modelle wurden mit identischen Anfangs- und Randbedingungen betrieben. Die qualitative Übereinstimmung der Simulationsergebnisse diente als unabhängige Prüfung der Modellverfahren.

## 3.2 Verifikation der Modelle

*„Zur Verifikation der Modelle wurden keine neuen Untersuchungen durchgeführt. Daher werden Extremwerte nach wie vor durch die verwendeten Modelle nicht abgebildet. Extremwerte führen aber zu den größten ausbaubedingten Änderungen im System. Somit ist das verwendete Verfahren nicht in der Lage, ausbaubedingte Änderungen abzubilden.“*

### Zusammenfassung der Stellungnahme

Prof. Dr. Schüttrumpf fordert, dass die Vorhabenträger nachweisen, dass das Modell und die durchgeführten Modellierungen die natürlichen Gegebenheiten zutreffend abbilden (Naturähnlichkeit). Ein solcher Nachweis wird nicht mit einer Modellverifikation geführt. Für den Nachweis der Naturähnlichkeit sind vielmehr die Kalibrierung und Validierung maßgeblich. Die Vorhabenträger haben die Modellierung ordnungsgemäß kalibriert und validiert. Neue Untersuchungen waren hierfür nicht erforderlich.

Es ist aus seinen Ausführungen auch nicht erkennbar, welchen Inhalt und Gegenstand diese Untersuchungen haben müssen. Unklar bleibt zudem, welche Extremwerte Prof. Dr. Schüttrumpf meint, die wegen der angeblich erforderlichen, aber nicht durchgeführten Untersuchungen nicht in der Modellierung berücksichtigt wurden. Tatsächlich berücksichtigt der Kalibrierungs- und Validierungsprozess sämtliche Extremereignisse in dem Untersuchungszeitraum – auch Peaks in den Messwerten. Es ist darüber hinaus nicht erforderlich, für den Nachweis der Naturähnlichkeit eines Modells, die Extremereignisse abzubilden und zu berücksichtigen, für die eine nur geringe Eintrittswahrscheinlichkeit besteht (vgl. Kap. 3.3).

### Stellungnahme

Prof. Dr. Schüttrumpf benutzt in seinen Einwendungen und Vorträgen den Begriff "Verifikation". Dem Kontext ist zu entnehmen, dass er damit die Fähigkeit oder Qualität der Modelle bezeichnet, Messergebnisse nachbilden zu können („Naturähnlichkeit“). Prof. Dr. Schüttrumpf nimmt Bezug auf Abbildungen aus der UVS, die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse zeigen. Gemeint ist folglich der Nachweis der Naturähnlichkeit durch Kalibrierung und Validierung. Der Begriff Verifikation ist in diesem Kontext daher unzutreffend.

Die Kalibrierung und Validierung der angesprochenen Modelle wurde erfolgreich durchgeführt und ist in den Planfeststellungsunterlagen dokumentiert (UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3.4., S. 45ff.). Zusätzliche Untersuchungen waren hierzu nicht erforderlich. Extremwerte (Peaks) innerhalb des Modellzeitraums werden hinreichend abgebildet. Erläuterungen zu diesen Aussagen folgen in diesem Kapitel. Extremereignisse mit kleineren Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie höhere Sturmflutwasserstände und deren Auswirkungen (Stichwort Hochwasserneutralität) müssen nicht explizit berücksichtigt werden (siehe Kap. 3.3 und 3.4).

Zur Vermeidung von Missverständnissen werden die drei Begriffe der Modellgenauigkeit nachfolgend näher erläutert: Verifikation, Kalibrierung und Validierung.

- Die Verifikation eines Modells befasst sich mit der Fragestellung, ob die dem Modell zugrunde liegenden Modellgleichungen und die gewählte numerische Lösung korrekt sind, d. h. Fehler können als mathematisch vernachlässigbar und die Programmierung der numerischen Lösung als fehlerfrei angesehen werden. (vgl. zur Definition von Verifikation auch LfU BW, 2003). Die Verifikation eines Modells (bzw. der Modellsoftware) erfolgt also nicht projektspezifisch, sondern wird übergeordnet z.B. in Handbüchern oder wissenschaftlichen Dokumentationen zur Modellsoftware dargestellt (MIKE Product Documentation).
- Ein Modell soll Prozesse, die in einem definierten Betrachtungsraum (hier der Fehmarnbelt und die Westlich Ostsee) möglichst naturnah nachbilden. Die Kalibrierung und Validierung dient dem Nachweis, dass das Modell dieser Anforderung gerecht wird. Grundsätzlich können in einem Modell nicht immer alle Prozesse im Detail abgebildet werden, weshalb zum Teil Vereinfachungen vorgenommen werden müssen. Diese Vereinfachungen können wiederum zu Ungenauigkeiten führen. Um diese Ungenauigkeiten identifizieren zu können und um ggf. Anpassungen am Modell vornehmen zu können, wird das Modell bzw. die mit Hilfe des Modells erzeugten Ergebnisse mit Naturwerten aus dem Betrachtungsraum verglichen. Im Fall der Festen Fehmarnbeltquerung wurden die Modellergebnisse mit Messdaten aus dem Jahr 2005 verglichen. Mit der Kalibrierung werden Fehler in den Eingabedaten des Modells erkannt und die Einstellungen verbessert, sodass die Modellergebnisse und die Messdaten in guter Übereinstimmung sind. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass ein Modell nie exakt die Messdaten wiedergeben kann, es verbleiben grundsätzlich Unterschiede/Abweichungen. (vgl. DWA 2016).
- Im Zuge der Validierung wird das kalibrierte Modell erneut mit Messdaten aus dem Betrachtungsraum verglichen, wobei es sich hierbei jedoch um einen anderen Datensatz handelt als den, der bei der Kalibrierung verwendet wurde. Ziel der Validierung ist es nachzuweisen, dass das Modell grundsätzlich geeignet ist die Prozesse in einem Betrachtungsraum abzubilden und nicht nur für eine bestimmte Messreihe/einen bestimmten Datensatz korrekt ist. Dies erfordert, dass für einen weiteren Zeitraum mit deutlich unterschiedlichen Randbedingungen (Hochwasser, Niedrigwasser etc.) Naturwerte vorliegen. Das Modell sollte in der Lage sein, auch diesen Zeitraum möglichst naturnah wiederzugeben (vgl. DWA 2016). Im Fall der Festen Fehmarnbeltquerung wurden die im Zuge der Bestandserfassung 2009 erhobenen Daten zur Validierung der lokalen Modelle der Westlichen Ostsee herangezogen.

Kalibrierung und Validierung basieren also auf projektspezifischen Daten, Messwerten und Modellen. Im Falle der Festen Fehmarnbeltquerung sind dies die Modelle der Hydrografie und Wasserqualität zur Bestandsbeschreibung und Auswirkungsprognose (UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3, S. 33ff. und Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1., S. 798ff.) sowie die umfangreiche Datenbasis der Bestandserfassung (UVS, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2., S. 10ff. und Band II A, Kapitel 3.2. S.

133 ff.). Die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung sind in der UVS, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3.4., S. 45ff. dargestellt. Die in der UVS gezeigten Abbildungen der Modellkalibrierung und –validierung sind eine Auswahl aus den Auswertungen an allen verfügbaren Messstationen und Tiefen von allen beteiligten Modellen. Weitere Ergebnisse und Abbildungen finden sich in FEHY 2013a. In der UVS werden der Übersichtlichkeit halber nur die zusammenfassenden Tabellen gezeigt.

Darüber hinaus wurden vor Beginn der Modellkalibrierung und –validierung Qualitätskriterien („acceptance criteria“) basierend auf dem Stand der Technik in anderen nationalen und internationalen Projekten erstellt, an denen die Güte und Naturähnlichkeit der verwendeten Modelle beurteilt werden kann (UVS, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3.4., S. 45 ff.). Die Qualitätskriterien beziehen sich auf statistische Kennwerte der betrachteten Zeitreihen, wie z.B. Standardabweichung, Mittelwert oder Bias. Es wird für jeden Parameter geprüft, ob die jeweiligen Kriterien für einen bestimmten Anteil aller verfügbaren Messdatensätze eingehalten werden. Beispiel Salzgehalt: es liegen 142 Messdatensätze für die Kalibrierung und 432 Sätze für die Validierung vor, es sollen für jeweils 80 % der Datensätze folgende Kriterien erfüllt sein: a) die Abweichung im Bias zwischen Messungen und Modell soll kleiner 1 PSU sein und b) die Abweichung im Wurzelfehlerquadrat (RMSE, root mean square error) soll unter 3 PSU liegen. Dieser Ansatz erlaubt Abweichungen zwischen Modellergebnissen und einzelnen Messdatensätzen, wenn die Mehrheit der Messdaten den Kriterien entsprechend nachgebildet werden kann. Es ist wichtig zu betonen, dass die Qualitätskriterien keine scharfen Grenzen darstellen, oberhalb oder unterhalb derer ein Modell ‚naturnah‘ ist oder nicht bzw. eine Modell ‚gut‘ ist oder nicht. Es sind vielmehr Richtwerte aus der Modellierpraxis, die als eine Art objektive Kontrolle der erreichten Modellqualität dienen sollen. Andere nationale und internationale Projekte verzichten z.T. auf die Festlegung solcher Qualitätskriterien und beurteilen Kalibrierungs- oder Validierungsergebnisse rein verbal argumentativ (z.B. BAW 2006).

Bei dem Vergleich von Modellergebnissen mit Messwerten sind einige prinzipielle Unterschiede dieser Werte zu beachten. Naturmessungen sind i.d.R. Punktmessungen (Wasserstand, Stoffkonzentrationen) oder Messungen in einem relativ kleinen Volumen (Strömungsgeschwindigkeit und Richtung bei ADCP-Messungen, wenige Zehner- bis Hunderter-Kubikmeter). Modellergebnisse hingegen repräsentieren einen Mittelwert für die Rechenzelle, aus der das jeweilige Ergebnis extrahiert wird (bei einem Dreieckselement mit ca. 100 m Kantenlänge und ca. 1 m Dicke ergibt sich ein Volumen von über 4.000 m<sup>3</sup>). Kleinskalige Prozesse können also Messergebnisse beeinflussen, während eine Glättung der Werte in der Natur der Sache eines jeden Modells dieser räumlichen Ausdehnung liegt.

Insbesondere in den Regionalmodellen mit größeren Gitterzellen ist daher zu erwarten, dass Extremwerte in den Messungen vom Modell nur abgeschwächt oder gar nicht wiedergegeben werden können. Die exakte Abbildung solcher Extremereignisse ist aber nicht von entscheidender Bedeutung. Wichtig ist vielmehr, dass die Modelle die typischen beobachteten regionalen Verhältnisse mit ihren jahreszeitlichen Variationen in der richtigen Größenordnung reproduzieren, da diese prägender sind für die hydrodynamischen Prozesse als vereinzelt im Laufe eines Jahres auftretende Extremereignisse (auf diese Fragestellung

geht Kap. 3.3 im Detail ein). Dieser Ansatz wurde mit den Bewertungskriterien verfolgt, die sich auf Stationen beziehen, für die Langzeitmessungen aus Ostseebecken verfügbar sind.

### **Sauerstoffkonzentration in der Zentralen Ostsee**

Prof. Dr. Schüttrumpf hat in seiner Präsentation vom 12.11.2005 als Beispiel für die nach seinen Worten „unzureichende Verifikation“ (nach obiger Definition ist hier die Validierung gemeint) der Regionalmodelle die Konzentration von gelöstem Sauerstoff an der Station K02 (ca. 70 km nord-östlich von Bornholm in der Zentralen Ostsee) angeführt (Abbildung 0-33, UVS, Anhang A, S. 69 – hier dargestellt in Abbildung 13). Es wird die zeitweise Abweichung zwischen bodennahen Messdaten (blaue Dreiecke) und Modellwerten (hellblaue Linie) kritisiert.

Oberflächennah (-5 m) werden die Sauerstoffkonzentrationen sehr gut vom Modell wiedergegeben (rote Dreiecke: Messung, magenta Linie: Modell). An der tieferen Messposition (-80 m) folgen die Modellergebnisse dem Trend der Messungen (blaue Dreiecke: Messung, hellblaue Linie: Modell). Die größeren Einstromereignisse (MBI's) der Jahre 1972, 1993 und 2003 werden gut wiedergegeben (Peaks in den bodennahen Sauerstoffkonzentrationen). Das Ereignis von 1976 und andere kleinere Einstromereignisse werden an diesem Punkt im Modell zwar nicht erfasst. Dies ist allerdings unschädlich. Entscheidend ist, dass insgesamt die typischen Eigenschaften und Prozesse im Modellgebiet in ihrem (jahres)zeitlichen Verlauf nachgebildet werden, auch wenn nicht jedes Einzelereignis im Modell abgebildet wird. Ziel der Modelle der Auswirkungsprognose ist nämlich nicht, eine größtmögliche Naturähnlichkeit zu erzielen. Vielmehr wird in der Auswirkungsprognose die Differenz der Modellergebnisse des Ist-Zustands und des Plan-Zustands betrachtet. Da die Abweichungen von den Messwerten in beiden Szenarien gleichermaßen vorkommen, bleibt die Aussagesicherheit hiervon unberührt. Die Modelleignung für die Auswirkungsprognose wird von den vorhandenen Abweichungen daher nicht in Frage gestellt.

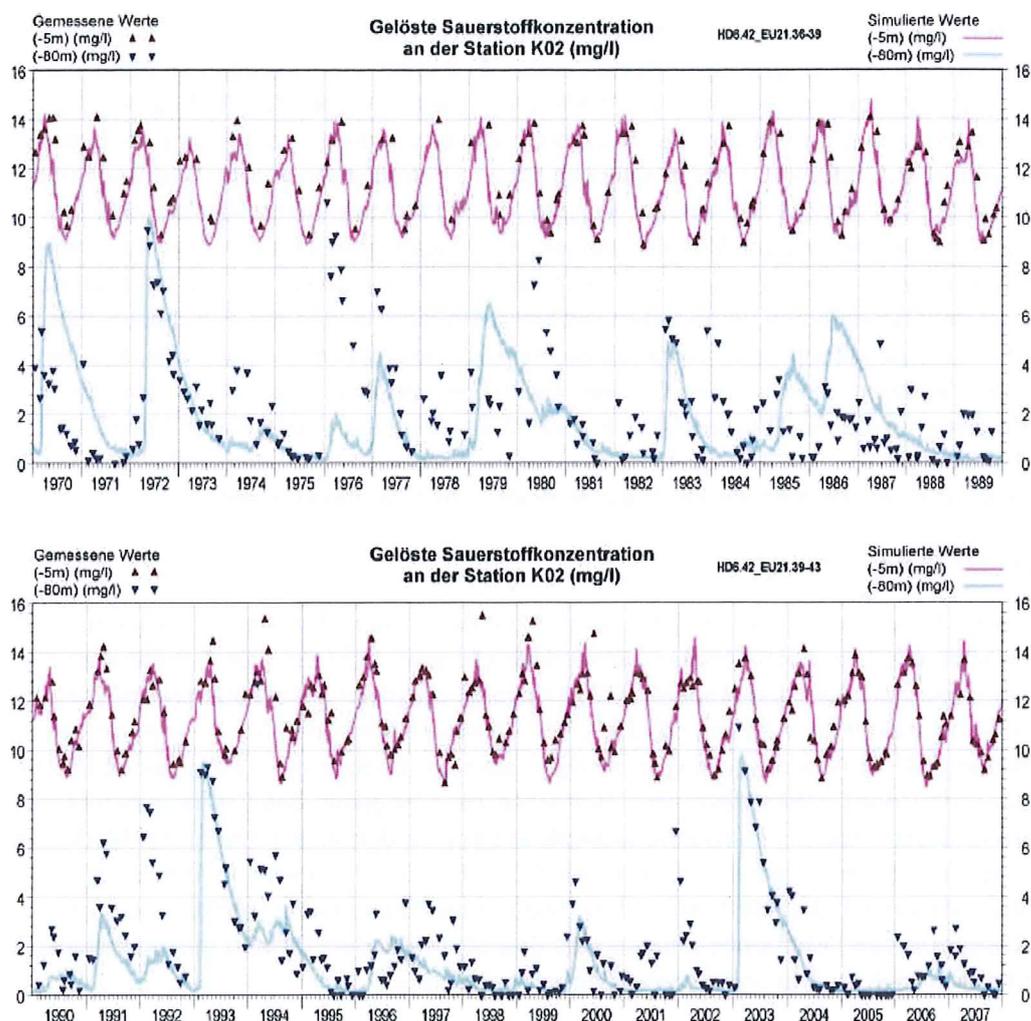


Abbildung 0-33 Vergleich zwischen gemessener und mit dem regionalen Ostseemodell (MIKE 3 FM HD) simulierter Entwicklung der gelösten Sauerstoffkonzentration (DO) an der Station K02 im Bornholmer Becken in dem Kalibrierungszeitraum (1970-1999, oben) und dem Validierungszeitraum (2000-2007, unten).

Abbildung 13: Vergleich zwischen gemessener und mit dem regionalen Ostseemodell (MIKE 3 FM HD) simulierter Entwicklung der gelösten Sauerstoffkonzentration (DO) an der Station K02 im Bornholmer Becken in dem Kalibrierungszeitraum (1970-1999, oben) und dem Validierungszeitraum (2000-2007, unten).

## Wasserstand am Pegel Landsort

Ein weiterer Kritikpunkt von Prof. Dr. Schüttrumpf ist die Wahl des Pegels Landsort (ca. 30 km südlich von Stockholm) als Referenz für die Kalibrierung und Validierung des Wasserstands in dem in der UVS verwendeten Regionalmodell der Ostsee. Er führt in seinem Vortrag als Argument eine Modellvalidierung für ein Regionalmodell der Ostsee der BAW an (BAW 2011), die drei Wasserstandspegel (Stockholm, Sassnitz und Warnemünde)

nutzt. Hierzu ist anzumerken, dass das dort vorgestellte Ostseemodell der BAW den lokal verfeinerten Untersuchungsbereich (Hafen Rostock) enthält und Aussagen zu projektbedingten Auswirkungen in diesem Gebiet treffen soll. Diese Aufgabe fällt im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung den lokalen Fehmarnbeltmodellen zu, deren Validierung des Wasserstands an sieben Stationen in der Westlichen Ostsee durchgeführt wurde. Das Regionalmodell der Ostsee dient in der Auswirkungsprognose im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung nicht zur Beurteilung von Wasserständen im Bauwerksumfeld und im Fehmarnbelt, sondern wird zur Langzeitprognose von regionalen Auswirkungen (z.B. Salzgehaltsänderungen in der Ostsee durch veränderten Wasseraustausch) eingesetzt. Für diesen Zweck ist die korrekte Abbildung des Füllgrades wichtig (d.h. des mittleren Wasserstands in der gesamten Zentralen und Östlichen Ostsee). Der Pegel Landsort ist zum Nachweis dafür bestens geeignet, da der Wasserstand dort kaum von Beckenschwingungen beeinflusst wird. Für eine vergleichbare Fragestellung nutzt die BAW (2011) mit dem Pegel Stockholm ebenfalls nur einen Referenzpegel in der Zentralen und Östlichen Ostsee.

### **Salzgehalt im Fehmarnbelt**

Als Beispiel für seine Kritik an der Naturähnlichkeit der lokalen Modelle der Westlichen Ostsee (an anderer Stelle auch Fehmarnbeltmodelle genannt) führt Prof. Dr. Schüttrumpf die Kalibrierungsergebnisse des Modells GETM für den Parameter Salzgehalt an der Station N01 im Fehmarnbelt an (Abbildung 0-29, UVS, Anhang A Methodik, S. 61 – hier dargestellt in Abbildung 14). In Abbildung 14 wird deutlich, dass der bodennahe Salzgehalt im frühen Sommer vom Modell unterschätzt wird. Betrachtet man hingegen das Ergebnis des MIKE-Modells für diese Position, so ist eine wesentlich bessere Übereinstimmung von Modell und Messung zu erkennen (Figure C1.6 aus FEHY 2013e – hier dargestellt in Abbildung 15). Für diese Station trifft das MIKE-Modell die bodennahe Einströmung dichten und salzhaltigen Wassers in den Fehmarnbelt besser, als das GETM-Modell. Dies ist mit Unterschieden in der lokalen Bathymetrie und Netzauflösung zu erklären.

Die Eignung der Modelle für dieses Projekt wird hierdurch nicht eingeschränkt. Ungeachtet der Unterschiede zwischen den Modellergebnissen sowie den punktuellen Abweichungen von den Messergebnissen: die Ergebnisse in Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen, dass charakteristische Salzgehaltsverteilungen im Fehmarnbelt von den Modellen nachgebildet werden können. Dazu zählen die im Jahresgang typischen Zustände im Sommer und Winter. Während der zumeist stürmischen Wintermonate wird das Wasser in der Westlichen Ostsee durchmischt, es stellt sich daher phasenweise im Fehmarnbelt über die gesamte Wassersäule ein mehr oder weniger identischer mittlerer Salzgehalt ein (Ereignisse in Januar und Dezember 2005 mit ca. 20 PSU an der Wasseroberfläche und am Meeresboden). In den ruhigeren Sommermonaten ist hingegen eine deutliche Differenz im Salzgehalt der boden- und oberflächennahen Wasserschichten zu sehen. Während an der Oberfläche des Fehmarnbelts brackiges Wasser in Richtung Nordsee strömt (ca. 10-15 PSU), fließt bodennah salzigeres und dichteres Wasser aus der Nordsee in Richtung Ostsee (ca. 25-28 PSU).

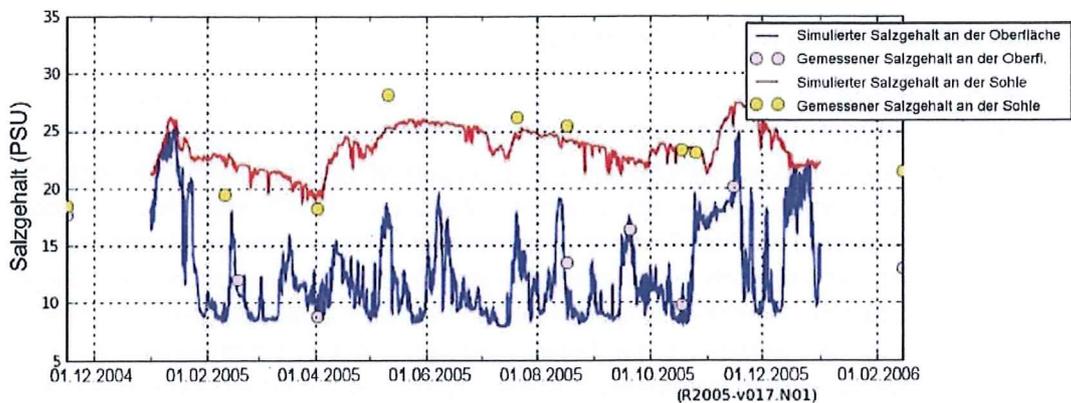


Abbildung 0-29 Simulierte sohlennahe und oberflächennahe Salzgehalte aus dem Fehmarnbeltmodell GETM im Vergleich zu den Messungen an der Station N01 aus 2005.

Abbildung 14: Simulierte sohlennahe und oberflächennahe Salzgehalte aus dem Fehmarnbeltmodell GETM im Vergleich zu den Messungen an der Station N01 aus 2005.

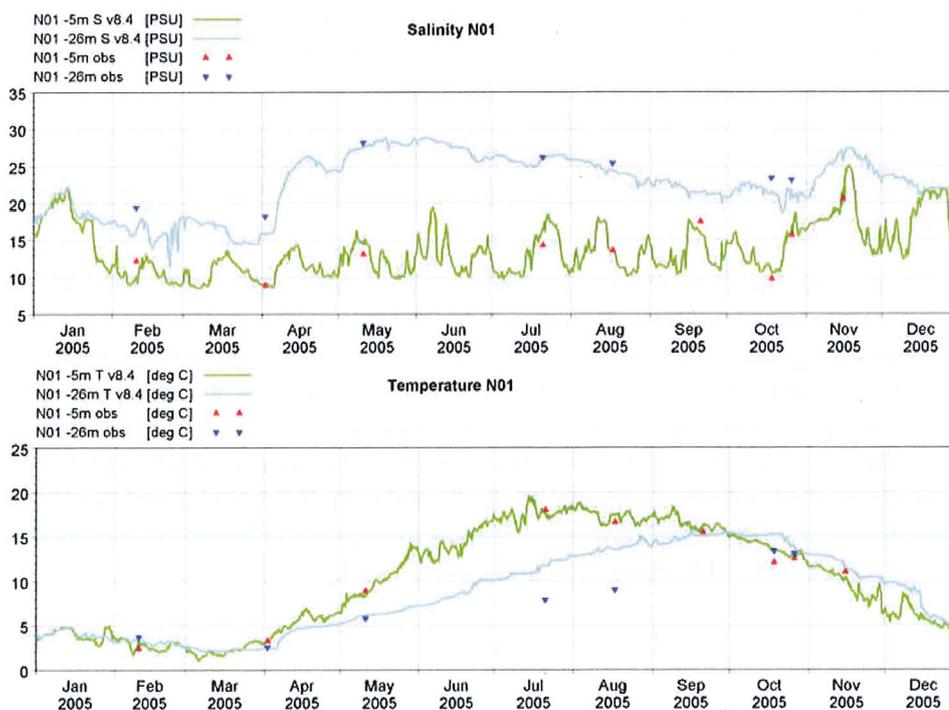


Figure-C1.6 → Salinity and Temperature comparison at N01 station for calibration period (surface and bottom values, see caption in plot). ¶

Abbildung 15: Kalibrierungsergebnisse für Salzgehalt (oben) und Temperatur (unten) an der Station N01 (oberflächen- und bodennahe Werte).

### Strömungsgeschwindigkeit im Fehmarnbelt

Weiterhin nimmt Prof. Dr. Schüttrumpf Bezug auf die Darstellung der bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildung 0-45 und 0-47, UVS, Anhang A Methodik, S. 93 ff.) der Modelle zur Auswirkungsprognose des Teilschutzguts Morphologie und Sedimente des Meeresbodens. Er kritisiert die Abweichungen von Mess- und Modellwerten. In den angesprochenen Abbildungen wird der Einfluss verschiedener Sohlrauheiten im Modell (0,05 und 25 mm) sowie der Vergleich mit Messergebnissen der Dauermessstation MS02 dargestellt. In den Abbildungen sind jeweils drei Zeitreihen (farbige Kurven) dargestellt: Messergebnisse (schwarz), Modell mit 0,05 mm Sohlrauheit (rot) und mit 25 mm Sohlrauheit (blau). Abbildungen 0-45 (hier dargestellt in Abbildung 16) und 0-47 (hier dargestellt in Abbildung 17) zeigen Ergebnisse für die Strömungsgeschwindigkeit, wobei in Abbildung 16 auch die zugehörige Strömungsrichtung dargestellt wird. Die Auswertung erfolgte für den gesamten Zeitraum der Messkampagne 2009, in den Abbildungen werden beispielhaft nur je zwei Teilzeiträume gezeigt.

Ziel des Vergleichs verschiedener Sohlrauheiten war die Kalibrierung des Modells zur Berechnung der Sedimenttransportraten. Die Transportraten wurden zur Prognose der Wiederverfüllraten des Tunnelgrabens nach Bauende genutzt.

Die Kurven der modellierten und gemessenen Strömungsrichtung liegen sehr nah beieinander, d.h. die Naturähnlichkeit des Modells ist hoch. Die Sohlrauheit hat kaum Einfluss auf die Strömungsrichtung.

Bei der Strömungsgeschwindigkeit zeigt sich eine bessere Wiedergabe der hohen Werte über 0,2 m/s im Falle einer niedrigen Sohlrauheit (0,05 mm). Ab dieser Geschwindigkeit ist mit einer Mobilisierung des anstehenden Sediments zu rechnen. Einige wenige Ereignisse mit hoher Strömungsgeschwindigkeit werden bei dieser Parameterwahl überschätzt (Ereignisse am 05. und 15.10.2009). An der zweiten Dauermessstation im Fehmarnbelt (MS01 auf dänischer Seite) zeigt der Vergleich von Modellergebnissen der Strömungsgeschwindigkeit bei geringer Sohlrauheit und Messwerten ebenfalls die Naturähnlichkeit der Simulation, hier fällt zudem die Überschätzung der Oktoberereignisse im Modell weniger stark aus (UVS, Anhang A Methodik, Abbildung 0-44 und 0-46 S. 92 ff.).

# Femern Sund $\approx$ Bælt

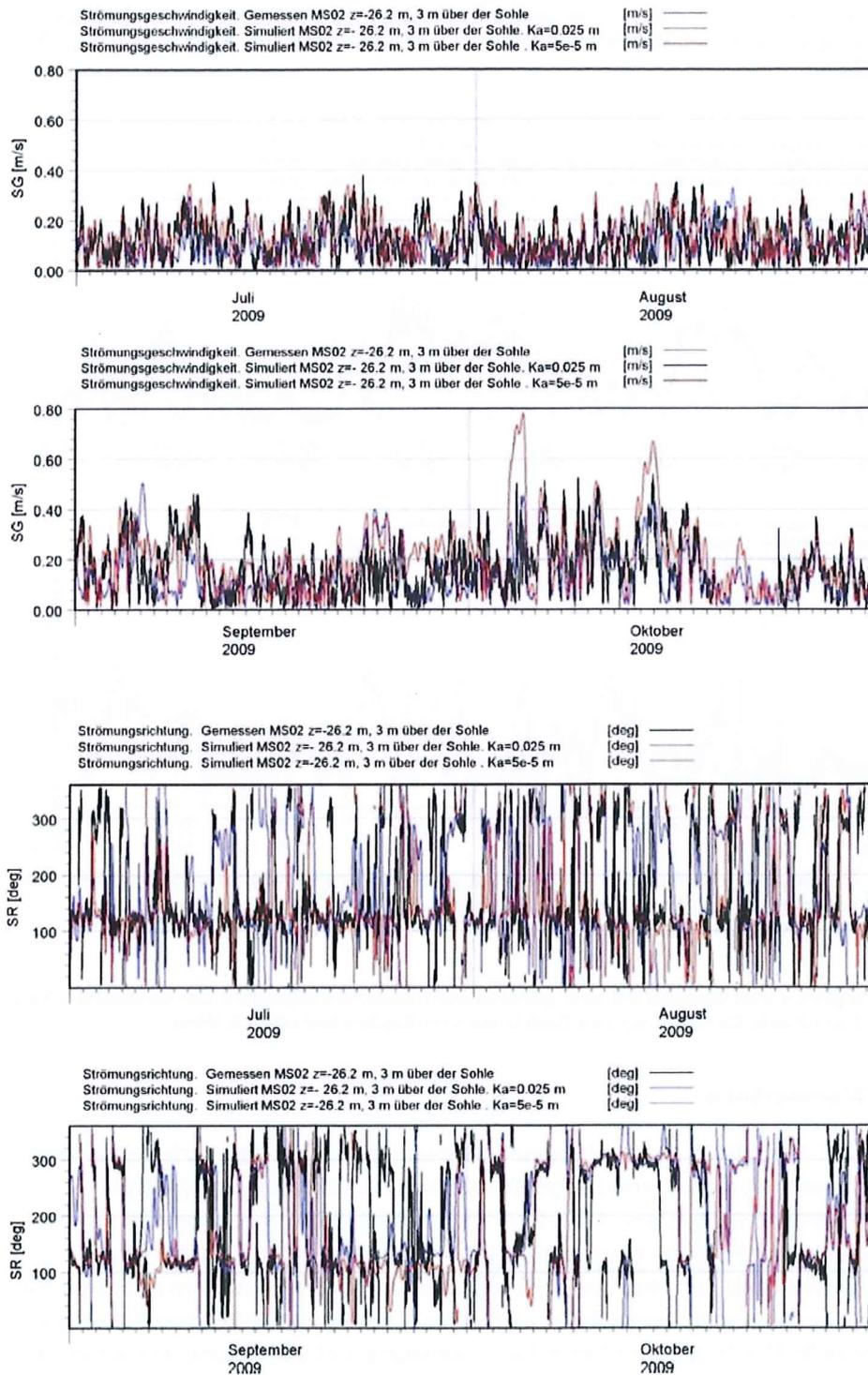


Abbildung 0-45 Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten und Richtungen der sohnahen Strömung an der festen Messstation MS02 im Femernbeltmodell. Sohlrauheit:  $k_{a,0} = 0,05$  mm und  $k_{a,0} = 0,025$  m

Abbildung 16: Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten und Richtungen der sohnnahen Strömung an der festen Messstation MS02 im Fehmarnbeltmodell. Sohlrauheit:  $k_{a,g} = 0,05$  mm und  $k_{a,g} = 0,025$  m

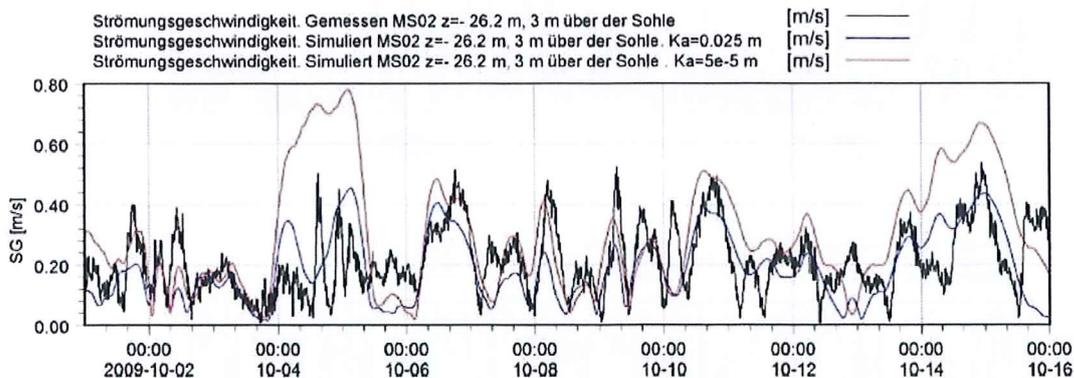
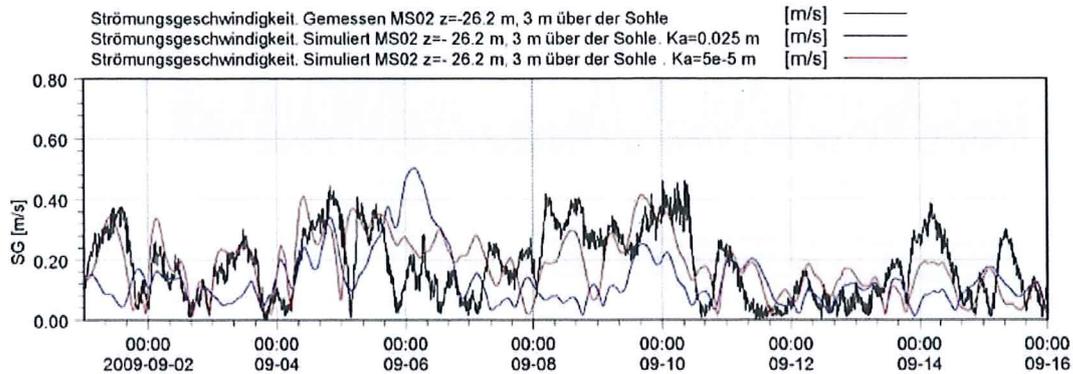


Abbildung 0-47 Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten und Richtungen der sohnnahen Strömung bei MS02. Detaillierte Darstellung von Zeiträumen im September und Oktober

Abbildung 17: Vergleich von simulierten und gemessenen Geschwindigkeiten der sohnnahen Strömung bei MS02. Detaillierte Darstellung von Zeiträumen im September und Oktober.

## Wasserstand Warnemünde

Als letztes Beispiel nennt Prof. Dr. Schüttrumpf die Naturähnlichkeit der modellierten Wasserstände und bemängelt nicht korrekt abgebildete Hochwasserereignisse (Beispiel Warnemünde: Abbildung 0-26, UVS, Anhang A Methodik, S. 56 – hier dargestellt in Abbildung 18). Auf die Betrachtung der prognostizierten Auswirkung des Bauvorhabens auf Extremhochwasserstände und den Nachweis der Hochwasserneutralität wird im nächsten Kapitel (3.3) explizit eingegangen. Hier wird zunächst die Modellgüte der Wasserstandsmodellierung dargestellt. Die Qualitätskriterien für Kalibrierung und Validierung werden an allen Stationen erfüllt (UVS, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3.4., Tabelle 0-16, S. 57). Für die Auswirkungsprognose werden alle im Jahr 2005 auftretenden Hochwasserereignisse und Sturmfluten in der Westlichen Ostsee im Modell abgebildet. Die Scheitelwasser-

stände werden dabei an der Station Warnemünde und anderen Pegeln im Modell unterschätzt (vgl. Abbildung 18). Dies stellt jedoch kein Problem für die Auswirkungsprognose dar, da davon unabhängig die Auswirkungen einer Bauwerksalternative auf diese Hochwasserstände im Modell verlässlich prognostiziert werden können: Die Wasserstände im lokalen Fehmarnbeltmodell sind im Wesentlichen von den Wasserstandsrandbedingungen im Kattegat und bei Bornholm abhängig (diese stammen aus den Regionalmodellen) während die projektbedingten Auswirkungen hingegen lokal im Fehmarnbelt von den dort geplanten Bauwerken verursacht werden.

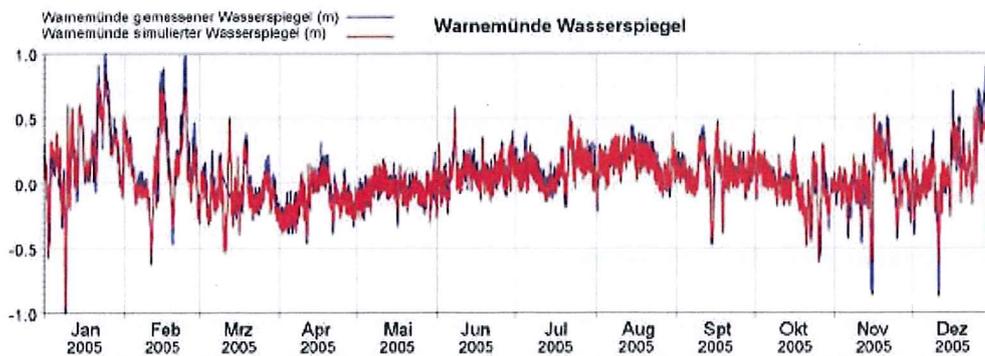


Abbildung 0-26 Kalibrierungsergebnisse des Fehmanbeltmodells MIKE 3 FM HD zum gemessenen (blau) und zum simulierten Wasserstand (rot) in Warnemünde an der Station MS03.

Abbildung 18: Kalibrierungsergebnisse des Fehmarnbeltmodells MIKE 3 FM HD zum gemessenen (blau) und zum simulierten Wasserstand (rot) in Warnemünde an der Station MS03.

### 3.3 Berücksichtigung von Extremwerten und Extremsturmfluten

*„In Anlage 15, Anhang C der UVS wird erneut auf die projektbedingten Auswirkungen auf Hochwasserstände eingegangen. Es kann festgestellt werden, dass mit einer zu groben Auflösung gearbeitet wird, da der Tunnel mit einem MIKE-Modell mit 100m Auflösung im Fehmarnbelt nicht im Simulationsverfahren abgebildet werden kann. Der Tunnel ist im Ausbauzustand somit gar nicht enthalten. Daher verwundert auch nicht, dass ausbaubedingte Änderungen nicht auftreten. Weiterhin findet eine Extrapolation von einem einjährigen Hochwasserereignis auf ein 200-jährliches Hochwasserereignis statt. Dies ist unzulässig, da Sturmfluten durch stark nichtlineare Effekte geprägt sind. Eine lineare Extrapolation ist nicht zulässig. Weiterhin muss festgestellt werden, dass aufgrund der sehr groben Auflösung und der verwendeten hydrologischen Szenarien die ausbaubedingten Änderungen bei Hochwasser auf Hydrografie, Sedimenttransport und Wasserqualität durch die verwendeten Modellverfahren sowie die untersuchten hydrologischen Ereignisse nicht ermittelt werden können.“*

#### Zusammenfassung der Stellungnahme

Die Vorhabenträger haben nachgewiesen, dass die Modellierung mit der gewählten 100-Meter Auflösung eine hinreichende Prognose der projektbedingten Auswirkungen ermöglicht. Der offene Tunnelgraben führt nicht zu projektbedingten Auswirkungen auf die Hydrographie, Sedimenttransport und die Wasserqualität im Fehmarnbelt, auch nicht bei Hochwasser. Es ist daher von vornherein nicht erforderlich, den Tunnel während der Bauphase (offener Tunnelgraben) oder nach dem Ende der Bauphase in dem Modell abzubilden (siehe oben, Kap. 3.1).

Zu dem Hinweis, dass die Auswirkungen eines 200-jährlichen Hochwasserereignisses nicht ordnungsgemäß prognostiziert sein sollen, nehmen die Vorhabenträger in dem folgenden Kapitel 3.4 Stellung.

#### Stellungnahme

Unter der Thematik "Extremwerte und Extremsturmfluten" werden von Prof. Dr. Schüttertrumpf in seinen Vorträgen zwei wesentliche Aspekte behandelt. Zum einen wird kritisiert, dass keine Extremereignisse im betrachteten Modellzeitraum vorkämen, wie sie für eine fachgerechte Betrachtung der Auswirkungen auf Teilschutzgüter wie Hydrografie oder Morphodynamik notwendig seien. Dieser Vorwurf ist zunächst einmal unabhängig von der in Kap. 3.2 diskutierten Modellgüte, sondern hängt allein mit dem gewählten Modellzeitraum zusammen. Zum anderen wird die Eignung des Rechengitters zur Prognose von Auswirkungen auf Hochwasserstände angezweifelt, da der Tunnelgraben nicht abgebildet werden könne. Das Thema Modellauflösung wurde bereits ausführlich in Kap. 3.1 behandelt, hierauf wird verwiesen. In diesem Kapitel wird speziell auf potenzielle Auswirkungen auf Sturmflutereignisse eingegangen. Kap. 3.4 betrachtet dann das Thema Hochwasserneutralität. Der Aspekt der Extrapolation auf extreme Hochwasserstände mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (z.B. 200-jährlicher Bemessungswasserstand) findet dort explizit Beachtung.

## *Extremereignisse im Modellzeitraum*

Der Modellzeitraum für die Auswirkungsprognose ist ein repräsentatives Jahr (2005, vgl. Kapitel 3.4). In diesem Jahr sind alle natürlich vorkommenden Extremereignisse (Wintertürme, Hochwasser, starker Seegang, Einstromereignisse, Stagnationsphasen) eines typischen Jahres im Fehmarnbelt enthalten.

Im Fehmarnbelt treten im Winter des Untersuchungsjahres mehrere Hochwasserereignisse auf. Für diese Ereignisse wurden die projektbedingten Auswirkungen auf alle relevanten Teilschutzgüter (z.B. Hydrografie und Wasserqualität, Meeresboden- und Küstenmorphologie) und diese Teilschutzgüter beeinflussende Faktoren (Sedimenttransport) untersucht und bewertet. Die naturschutzfachliche Bewertung der Auswirkungen ändert sich bei selteneren Ereignissen nicht. Solch ein Hinweis wird auch von Prof. Dr. Schüttrumpf nicht geliefert.

Die Aussagekraft des Modells lässt sich nicht deswegen anzweifeln, weil keine Extremereignisse mit selteneren Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt wurden. Im Gegensatz zu der Auffassung von Prof. Dr. Schüttrumpf sind es nicht die seltenen extremsten Ereignisse, die dominierend für Küsten- und Meeresbodenmorphologie sind, sondern es sind die viel häufiger auftretenden ‚moderaten‘ Extremereignisse, die bestimmend sind. Diese Ereignisse mit hohem Wasserstand, starken Strömungen und hohen Wellen sind im repräsentativen Jahr 2005 enthalten. Für den Küstenlängstransport (und damit die Küstenmorphologie) sind beispielsweise nicht die Extremwellen von besonderer Bedeutung, da diese zwar sehr hoch, aber auch sehr selten sind. Vielmehr wird der Küstenlängstransport von Wellen dominiert, deren Wellenhöhe ( $H_s$ ) an etwa 4 % eines Jahres erreicht oder überschritten wird (also etwa für zwei Wochen pro Jahr). Im Fehmarnbelt sind dies Wellen mit einer Höhe von etwa 1,25 m. Die Wellenrosen lassen diesen Bereich in den Modellergebnissen gut erkennen (UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Kap. 0.1.2.4.3., S. 121).

## *Tunnelgraben und Hochwasserereignisse*

Die generelle Eignung der räumlichen Modellauflösung zur Simulation der untersuchten physikalischen Prozesse (wie z.B. Hochwasserstand) wird nicht bezweifelt, die verwendete räumliche Auflösung von 100 m ist vollauf geeignet, Hochwasserereignisse und projektbedingte Auswirkungen auf den Wasserstand abzubilden. Andere numerische Modelle, die im Rahmen des KFKI-Verbundprojekts MUSTOK explizit zur Untersuchung von Hochwasserereignissen an der Deutschen Ostseeküste entwickelt wurden, nutzen gröbere räumliche Auflösungen in ihren Rechengittern im (z.B. 900 m, Bork und Müller-Navarra (2009) oder 600 m und 900 m, Bruss et al. (2009)), als die in den lokalen Fehmarnbeltmodellen verwendete Auflösung von 100 m.

Hochwasserereignisse in der Westlichen Ostsee entstehen durch großräumig wirkende Prozesse wie durchziehende Hoch- und Tiefdruckgebiete sowie die damit einhergehenden Windfelder und können durch regionale Faktoren wie Füllungsgrad und Eigenschwingungen der Ostsee, vorhergehende Wetterverhältnisse oder den Wasseraustausch mit der Nordsee mehr oder weniger stark beeinflusst werden. Zu den genauen Ursachen und dem

Ablauf von Extremhochwasserständen in der Westlichen Ostsee gibt es verschiedene wissenschaftliche Meinungen, Bork und Müller-Navarra (2009) haben im Forschungsprojekt MUSE-Ostsee jedoch alle diskutierten Einflussfaktoren für Extremhochwasser modellgestützt untersucht und konnten für das Ereignis von 1872 eine maßgebliche Rolle der Faktoren Füllungsgrad und Eigenschwingungen ausschließen. Vielmehr werden das Durchziehen eines Sturmsystems kurz vor dem eigentlichen Extremhochwasser und die Konstellation der regionalen meteorologischen Zustände über Nordeuropa und Skandinavien als maßgeblich angesehen. Keiner dieser Faktoren wirkt ausschließlich auf lokaler Skala.

Der Einfluss lokaler, kleinräumiger Bauwerkstrukturen des Absenktunnels auf Hochwasserstände im Modellzeitraum 2005 ist als praktisch nicht vorhanden ermittelt worden (Änderung unter 0,1 mm, UVS, Anlage 15 der Planänderungsunterlagen, Kapitel 4.2.3.2., Anhang C, Seite 96). Es gibt keinen plausiblen Grund, warum diese Prognose für höhere Wasserstände ihre Gültigkeit verlieren sollte.

Der Tunnelgraben ist hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die Hydrodynamik außerhalb des Grabens selbst unbedeutend (Kapitel 3.1). Diese Bauwerksstruktur kann daher keine messbaren Auswirkungen auf die Hochwasserstände im Fehmarnbelt oder der Westlichen Ostsee haben. Es können sich somit durch den Tunnelgraben auch keine veränderten Auswirkungen auf Sedimenttransport und Wasserqualität bei Hochwasserereignissen ergeben. Daher muss die Struktur für deren Prognose nicht im Modell enthalten sein.

### 3.4 Nachweis der Hochwasserneutralität

*„Wie zuvor bereits erwähnt, findet eine lineare Extrapolation von einem einjährigen Hochwasserereignis auf ein 200-jährliches Hochwasserereignis statt. Dies ist fachlich unzulässig. Somit fehlt der Nachweis der Hochwasserneutralität der Maßnahme. Auch der Hinweis, der Bauhafen läge im Lee des derzeitigen Hafens ist unzulässig, da an der Ostsee im Gegensatz zur Nordsee Sturmfluten nicht nur aus Westen, sondern auch aus Osten aufgrund der Beckenschwingung der Ostsee auftreten können.“*

#### Zusammenfassung der Stellungnahme

Der Vorwurf, die Vorhabenträger hätten eine lineare Extrapolation für die Bewertung der Hochwasserneutralität durchgeführt, geht an der tatsächlichen Prüfung vorbei. Es wurde nicht von einem Hochwasserereignis auf den Wasserstand eines seltenen Extremhochwassers extrapoliert. Vielmehr wurde die projektbedingte Auswirkung auf den Höchstwasserstand in 2005 bestimmt und diese Auswirkung dann auf höhere Wasserstände extrapoliert und auf wenige Millimeter prognostiziert.

#### Stellungnahme

Die komplexen Ursachen für die Entstehung und Entwicklung von Extremhochwasserereignissen in der Westlichen Ostsee werden in Kapitel 3.3 angesprochen. Es ist fachlich unstrittig, dass von einem Hochwasserereignis im Jahr 2005 nicht linear auf den Wasserstand eines seltenen Extremhochwassers (z.B. das 200-jährliche Hochwasser von 1872) extrapoliert werden kann. Dies wurde für den Nachweis der Hochwasserneutralität in der UVS (UVS, Anlage 15 der Planänderungsunterlagen, Anhang C, Kapitel 4.2.3., Seite 95 ff.) weder getan noch wird es in den Unterlagen behauptet. Vielmehr wurde die projektbedingte Auswirkung auf den Höchstwasserstand in 2005 bestimmt (maximal 0,1 mm im direkten Umfeld der küstennahen Bauwerksstrukturen). Diese Auswirkung wurde dann auf höhere Wasserstände extrapoliert und auf wenige Millimeter prognostiziert (d.h. ohne jede Bedeutung für den Hochwasserschutz oder andere Belange). Im Gegensatz zu den Entstehungsmechanismen für Extremhochwasserständen spricht bei der Betrachtung der projektbedingten Auswirkung auf diese Wasserstände kein physikalisches Argument gegen eine lineare Extrapolation.

Zu dem Beispiel Arbeitshafen: Die Bauwerksstruktur engt den Fließquerschnitt im Fehmarnbelt nicht ein, die Spitzen der Molen des Fährhafens Puttgarden definieren den maßgeblichen Querschnitt (eine Querschnittsverengung würde den hydraulischen Widerstand erhöhen, wodurch sich der Durchfluss reduzieren würde und es potentiell zu einem Aufstau vor der Verengung kommen könnte). Es kann daher lediglich zu lokalen Effekten im direkten Bauwerksumfeld kommen (die maximal auftretenden 0,1 mm Wasseranstieg). Die Ursache/Herkunft der in der Westlichen Ostsee auftretenden Sturmfluten ist für diese Überlegung nicht erheblich.

### 3.5 Regenerationszeit des Meeresbodens

„Zur natürlichen Wiederverfüllung des Tunnelgrabens finden sich weitere verbale Ergänzungen in Anlage 15, Anhang C der UVS. Hierbei handelt es sich um rein verbale Erläuterungen. Ein Nachweis der Wiederverfüllungsraten im Testfeld findet nicht statt. Es werden keine Ergebnisse (z.B. Vermessungen) der Wiederverfüllungsraten im Testfeld gezeigt. Somit sind die Erläuterungen nicht nachvollziehbar. Außerdem stellt der Vorhabensträger selber fest, dass das Testfeld nur die halbe Breite des Tunnelgrabens besitzt und auch in anderen Wassertiefen liegt. Damit können die Ergebnisse des Testfelds nicht auf den Tunnelgraben übertragen werden. Der Nachweis der Regeneration des Meeresbodens liegt somit nicht vor.“

#### Zusammenfassung der Stellungnahme

Die Ausführungen der Vorhabenträger zur Reperation des Meeresbodens, insbesondere zu den Wiederverfüllungsraten sind nachvollziehbar und plausibel. Die Modellergebnisse zur Berechnung der Sedimentationsraten entlang der Tunneltrasse konnten mit Versuchen am Testfeld plausibilisiert werden. Da die Wiederverfüllung des Tunnelgrabens von den gleichen Faktoren und physikalischen Mechanismen bestimmt wird, wie sie auch am Testfeld wirksam sind, lassen sich die Ergebnisse zur Wiederverfüllung aus dem Testfeld auf den Tunnelgraben übertragen.

#### Stellungnahme

Die Prognose der natürlichen Wiederverfüllung des Tunnelgrabens stützt sich auf Modellrechnungen zur Ermittlung der Sedimenttransportraten entlang der Tunneltrasse. Die Eingangsdaten dieser Rechnungen stammen aus der Strömungsmodellierung (Sohlschubspannungen) und Substratkartierung (Korngrößenverteilung entlang der Tunneltrasse). Die Ermittlungsgrundlagen der Wiederverfüllung finden sich in der UVS in Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.3., S. 75 ff.

Das Testfeld wurde für geotechnische Untersuchungen konzipiert. Quasi als Nebenprodukt wurden Sedimentationsmächtigkeiten im Verlauf der Versuchslaufzeit des Testfeldes gemessen. Diese Sedimentmengen konnten mit dem Modell zur Berechnung der Wiederverfüllung des Tunnelgrabens nachgerechnet werden. Die Ergebnisse aus dem Testfeld dienen damit der Plausibilisierung des Modells zur Berechnung der Sedimentationsraten. Hierzu wurde mit dem Modell zur Prognose der Wiederverfüllung des Grabens eine Sedimentationsrate für das Testfeld berechnet. Dabei wurden die im Bereich des Testfeldes vorhandenen Bodenarten, die Geometrie des Testfeldes, die Tiefenlage und die Dauer der Felduntersuchungen berücksichtigt. Die gemessene Sedimentationsrate (Sedimenteintrag in  $\text{m}^3$  pro Meter Testfeldbreite) wurde mit der entsprechenden Rate aus der Modellrechnung verglichen. Die ermittelten Raten liegen hinreichend dicht beieinander (2-3  $\text{m}^3/\text{m}$  gemessen und ca. 3  $\text{m}^3/\text{m}$  berechnet). Das Modell zur Prognose der Wiederverfüllung konnte für die testfeldspezifischen Bedingungen validiert werden.

Für die Plausibilisierung der Modellergebnisse entlang der Tunneltrasse spielen die Unterschiede in Abmessung, Versuchslaufzeit und Tiefenlage keine Rolle. Die Wiederverfüllung

wird von den gleichen Faktoren und physikalischen Mechanismen bestimmt, wie sie auch am Testfeld wirksam sind. Daher kann aus gutem Grund angenommen werden, dass die Naturähnlichkeit des Modells ebenso für alle Bereiche der Tunneltrasse gegeben ist.

Das Modell zur Prognose der Wiederverfüllung des Tunnelgrabens nimmt eine konstante Tiefe des Grabens nach Bauende von ca. 1 m an. Die Tiefe ergibt sich aus dem Abstand zwischen Oberkante der Schutzschicht auf dem Tunnel und dem vormals vorhandenen Meeresboden. In der Realität wird dieser Abstand jedoch wegen der natürlichen Unebenheiten im Meeresbodenprofil im Vergleich zum geometrisch glatten Verlauf des Tunnels von der angenommenen Tiefe abweichen. An Stellen, an denen größere Tiefen zu erwarten sind (d.h. die Dauer der Wiederverfüllung länger als prognostiziert würde), wird nach Bauende bis zur angenommenen Tiefe mit Sand verfüllt (UVS, Anlage 15 der Planänderungsunterlagen, Anhang C, Kap. 4.2.5. S. 100 ff.).

Die natürliche Wiederverfüllung des Tunnelgrabens nach Bauende wird im Rahmen des marinen Monitoringprogramms überwacht (Anlage 22.9 der Planänderungsunterlagen, Kap. 3.2.7., Seite 56).

### **3.6 Berücksichtigung von deutschen Daten, Unterlagen, Dokumenten, Regelwerken, Gesetzen und Generalplänen**

*„Daten, Unterlagen, Dokumente, Regelwerke, Gesetze und Generalpläne, die in Deutschland vorliegen, wurden auch in den neuen Unterlagen erneut nicht berücksichtigt. Es bekräftigt sich der Eindruck, dass die dänische Seite die deutschen Gesetze und Regelwerke ignoriert. Als Beispiel möchte ich die weiterhin fehlende Berücksichtigung der Bemessungswasserstände und die Rechnungen mit einem zu niedrigen Wasserstand erwähnen. Dies ist unzulässig.“*

#### **Zusammenfassung der Stellungnahme**

Die Kritik von Prof. Dr. Schüttrumpf ist ungeeignet, um Versäumnisse in den Planfeststellungs- und -änderungsunterlagen aufzuzeigen. Prof. Dr. Schüttrumpf benennt in seiner Kritik keine konkreten Daten, Unterlagen, Dokumente, Regelwerke, Gesetze oder Generalpläne, die in Deutschland verfügbar und zwingend für die Bewertung des Vorhabens heranzuziehen wären, ohne dass die Vorhabenträger sie berücksichtigt hätten. Das gilt insbesondere im Hinblick auf die staatsvertragliche Vereinbarung, wonach das Vorhaben nach den geltenden dänischen technischen Normen und Vorschriften gebaut werden soll. Es ist aus der pauschalen Kritik auch nicht ersichtlich, dass die Anwendung von anderen Daten, Unterlagen, Dokumenten, Regelwerken, Gesetzen oder Generalplänen dazu führen würde, dass die Umweltauswirkungen anders zu bewerten wären.

#### **Stellungnahme**

Es ist nicht zu erkennen, welcher Erkenntnisgewinn sich in der Auswirkungsprognose und der Bewertung der Umweltauswirkungen des Projekts hätte ergeben können, wenn weitere Mess- oder Projektdaten aus Deutschland oder anderswo in die Untersuchung einbezogen worden wären. Die Modelle wurden hinreichend und mit relevanten nationalen und internationalen Datensätzen kalibriert und validiert. Die beteiligten Fachgutachter bei der Erstellung der Modellgrundlagen – IOW aus Deutschland und DHI mit Niederlassungen in Dänemark und Deutschland – haben jahrzehntelange Erfahrung mit numerischer Modellierung und Messdatenerfassung im Meeressystem Ostsee.

Es lassen sich insbesondere in der Präsentation vom 12.11.2015 Hinweise auf konkrete deutsche Quellen finden:

*DWA-Regelwerke* für die Auflösung der numerischen Rechengitter: Prof. Dr. Schüttrumpf hat in seinen Ausführungen kritisiert, dass Vorgaben zur Modellauflösung aus den Regelwerken der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) nicht berücksichtigt worden wären. Er schreibt dazu: „DWA: 1. Das numerische Modell soll die örtlichen Gegebenheiten möglichst exakt wiedergeben. Hierzu wäre es theoretisch notwendig, jede auch noch so kleine Struktur mit einem Berechnungsknoten zu erfassen.“ Einleitend ist anzumerken, dass es sich bei den DWA Regelwerken um Hilfestellungen aus der Modellierpraxis für die Modellierpraxis handelt, nicht um rechtsverbindliche Vorgaben. Die Fundstelle des Zitats von Prof. Dr. Schüttrumpf konnte nicht gefunden werden, es fehlt

eine konkrete Quellenangabe. In der Merkblatt-Reihe „Geodaten für die Fließgewässermo-  
dellierung“ (DWA 2015a) steht zum Thema räumliche Modellauflösung und Elementgröße  
hingegen:

„Einerseits muss das Berechnungsnetz so hoch aufgelöst sein, dass alle hydraulisch rele-  
vanten Strukturen und Strömungsprozesse abgebildet werden können. Auf der anderen  
Seite resultieren aus zu feinen oder zu vielen Zellen unter Umständen enorme Rechenzei-  
ten, welche die numerische Modellbearbeitung gegebenenfalls ineffizient oder sogar un-  
möglich machen können. Für den Modellierer gilt es demnach entsprechend dem Grund-  
satz „So fein wie nötig, so grob wie möglich“ zu verfahren. Dabei sind insbesondere auch  
die geforderten Zielgrößen bzw. -genauigkeiten zu berücksichtigen. Das Durchführen von  
Sensitivitätsanalysen in Form von Berechnungen mit mehreren Gittern unterschiedlicher  
Auflösung hilft oftmals dabei, den Einfluss des Berechnungsgitters auf die Modellergeb-  
nisse zu quantifizieren.“

Das DWA-Regelwerk hebt die Notwendigkeit der Berücksichtigung aller hydraulisch rele-  
vanten Strukturen und Strömungsprozesse und die Betrachtung der geforderten Zielgrößen  
und -genauigkeiten hervor. Kapitel 3.1 beschreibt im Detail, wie die gewählte Auflösung  
dieser Forderung nachkommt. Ebenso wird dort der Einfluss unterschiedlicher Modellauf-  
lösungen auf das Rechenergebnis (Sensitivitätsanalyse) erläutert. Das DWA Regelwerk for-  
dert gerade nicht, feiner als notwendig aufzulösen und „jede noch so kleine Struktur“ zu er-  
fassen.

In die gleiche Richtung geht die Anmerkung zu generellen Anforderungen an die Modellie-  
rung (DWA 2015a):

„Beim Modelleinsatz kommt es nicht unbedingt darauf an, die realen Strömungsprozesse  
einschließlich der turbulenten Fluktuationen in größtmöglicher räumlicher und zeitlicher  
Auflösung möglichst exakt nachzubilden. Vielmehr muss ein dem Anwendungsziel ange-  
passtes Modell die für die jeweilige Entscheidungsfindung notwendigen und wesentlichen  
Größen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anforderungen an Genauigkeit und  
Prognosefähigkeit sowie Erstellungsaufwand und Modellhandling (Schnittstellen, Rechen-  
zeit) bereitstellen. Daraus ergibt sich, dass als entscheidendes Bewertungskriterium im  
Rahmen der Qualitätssicherung eines Fließgewässermodells in der wasserwirtschaftlichen  
Praxis die Genauigkeit der Abbildung der anwendungsbezogenen Zielgröße anzusehen  
ist.“

Auch an dieser Stelle wird betont, dass es in der anwendungsbezogenen Modellierung  
nicht um größtmögliche Detailtiefe geht. Vielmehr muss ein Modell auf die im Projekt gefor-  
derte Aussagegenauigkeit und Prognosefähigkeit abgestimmt werden. In Kapitel 3.1 wird  
gezeigt, dass eine Verfeinerung der Modelle die Modellergebnisse nicht verändert und  
dass durch die Einbindung des Tunnelgrabens keine anderen vorhabenbedingten Auswir-  
kungen zu erwarten sind. Vor diesem Hintergrund ist es nicht erforderlich, in einem ande-  
ren Umfang als dem gewählten, Bauwerksstrukturen bei der Modellierung zu berücksichti-  
gen oder die räumliche Modellauflösung weiter zu verfeinern.

*LAGA-Regelwerke* für das Mindestuntersuchungsprogramm für Bodenuntersuchungen:  
Es sind keine Vorgaben aus LAGA-Regelwerken ersichtlich, die für das Vorhaben zwingend anzuwenden sind und durch die Vorhabenträger in den Planfeststellungs- und -änderungsunterlagen nicht abgearbeitet werden.

#### *Generalpläne Küstenschutz der Länder:*

Es wurden alle relevanten Quellen zur fachgerechten und vollständigen Erstellung der Umweltverträglichkeitsstudie herangezogen. Insbesondere wurden alle einschlägigen nationalen Regelwerke beachtet. Für die Bemessung der küstenschutzrelevanten Bauwerksteile wurden die einschlägigen Regelwerke (Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG) und Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (Landeswassergesetz – LWG)) und die darin enthaltenen Bemessungswerte verwendet.

#### *DIN 4049 zur Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten:*

Die Norm enthält Begriffsbestimmungen zur Hydrologie, keine Analysevorschriften oder Bewertungskriterien für Strömungsgeschwindigkeit oder andere Parameter.

#### *WHG (Wasserhaushaltsgesetz) und WaStrG (Wasserstraßengesetz) zum Nachweis der Hochwasserneutralität:*

Es wurde der Nachweis geführt, dass es keine relevanten projektbedingten Auswirkungen auf Hochwasserstände geben wird, dies wird ausführlich in den Kapiteln 3.3 und 3.4 dargestellt.

Ein konkretes Beispiel von *deutschen Untersuchungsergebnissen*, die nach Prof. Dr. Schüttrumpf hätten einbezogen werden müssen, wird beim Thema „Regenerationszeit Meeresboden“ gegeben:

Basierend auf den Untersuchungen von Gruß 2004 wird a) versucht, die Raten der natürlichen Wiederverfüllung zu widerlegen (Präsentation 12.11.2015 und Stellungnahme vom 08.06.2014, Seite 29) und b) die angesetzten Sedimentfreisetzungsraten bei den marinen Bauarbeiten in Zweifel zu ziehen (Stellungnahme vom 08.06.2014, Seite 17).

Zu a): Bei den von Gruß betrachteten Vorgängen handelt es sich um das Verhalten von verklapptem Mergel und Mischboden. Gruß beurteilt aufgrund von Fächerecholotpeilungen die Erosion und den Abtransport von diesem Material über die Zeit. Es liegen in der zitierten Untersuchung keine detaillierten Informationen zu Strömungsgeschwindigkeiten oder Materialzusammensetzung vor, die einen direkten Vergleich mit den Verhältnissen im Fehmarnbelt erlauben würden. Es lohnt sich aber ein Blick auf das gewählte Zitat von Prof. Dr. Schüttrumpf: „Gruß schreibt: *Es ist offensichtlich kein Material zwischen August 2001 und Oktober 2002 abtransportiert worden. ... Die Erosion dagegen ist statistisch als 0 zu betrachten (Zitat).*“

An anderer Stelle schreibt Gruß hingegen: „*Beim Mischboden sind zwischen Juni und August 2001 ungefähr 37 % des Ausgangsvolumens verlagert worden. Im Zeitraum zwischen August 2001 und Oktober 2002 kam es zur Verlagerung von ca. 17 %. Die Angaben sind mit einer Genauigkeit von +/- 15 % behaftet.*“ Dies belegt, dass sehr wohl Umlagerungsprozesse in dem von Gruß beschriebenen Meeresgebiet vorkommen.

Der vollständige Kontext zur Erosion lautet: „Nach den Berechnungen in 4.1.3 sind im Zuge der Materialverlagerung 192 m<sup>3</sup> erodiert und 297 m<sup>3</sup> sedimentiert. Die Genauigkeit dieser Volumenangaben kann aus dem Produkt der Sedimentations- bzw. Erosionsflächen und der mittleren Tiefengenauigkeit der Klappstellen berechnet werden. Das erodierte Volumen ist mit einer Genauigkeit von +/- 240 m<sup>3</sup> und das sedimentierte mit +/- 214 m<sup>3</sup> bestimmt worden. Damit liegt das sedimentierte Volumen außerhalb der Genauigkeit und ist damit signifikant. Die Erosion dagegen ist statistisch als 0 zu betrachten. Wie beschrieben kann kein Transport in die Klappfläche des Mergels stattgefunden haben. Da aber Material sedimentiert ist, muss im Gegenzug Erosion stattgefunden haben, die allerdings im Rahmen der Ungenauigkeit liegen wird.“

Das gewählte Zitat in der Einwendung ist damit zumindest als unvollständig zu betrachten, da Gruß darauf hinweist, dass sehr wohl Erosion stattgefunden hat, diese allerdings innerhalb der Messungenauigkeit liegt (192m<sup>3</sup> +/- 240 m<sup>3</sup> Erosion). Auch andere Stellen in der Arbeit von Gruß stützen Prof. Dr. Schüttrumpfs Argument nicht.

Zu b) Die Vorgänge bei einer Verklappung unterscheiden sich prinzipiell deutlich von denen bei Nassbaggerarbeiten. Bei einer Verklappung wird Material i.d.R. aus Schuten über einer Verbringungsstelle abgelassen. Es wird also zunächst 100 % des verklappten Materials in die Wassersäule abgegeben. Ein Teil des Materials sinkt auf den Meeresboden und verbleibt dort zunächst, der Rest wird in Abhängigkeit von Korngröße und Strömungsgeschwindigkeit verdriftet. Bei den geplanten Nassbaggerarbeiten zum Grabenaushub wird Boden mit verschiedenen Baggertypen gefördert, auf Schuten verladen und in den Bereich der Landgewinnungsflächen verbracht. Dabei geht am Meeresboden, in der Wassersäule und an der Wasseroberfläche ein kleiner Teil des geförderten Materials verloren und wird mit der Strömung verdriftet. Die beiden Freisetzungsmechanismen sind keinesfalls vergleichbar, daher wären auch Freisetzungsraten aus der Arbeit von Gruß nicht auf die marinen Baggerarbeiten im Projekt Feste Fehmarnbeltquerung übertragbar.

Dennoch ist auch hier ein Blick auf die von Prof. Dr. Schüttrumpf gewählten Aussagen von Gruß interessant: „Gruß (2004) zeigt, dass 54% des verklappten Materials von Mischboden nach der Verklappung verdriftet wurde.“ Prof. Dr. Schüttrumpf stellt diese Prozentangabe in direkten Vergleich mit den in der Sedimenttransportmodellierung verwendeten Freisetzungsraten (z.B. 3,5 % für den Grabenaushub). Die Zahl 54 % steht bei Gruß jedoch in einem anderen Kontext: „Vom Verklappungsexperiment bis Oktober 2002 sind 54 % des Mischbodens verloren gegangen, was in etwa dem Sandanteil im Mischboden entspricht.“ Die Prozentangabe bezieht sich also auf einen Zeitraum von ca. 16 Monaten, da die Verklappung im Juni 2001 stattfand. Es ist völlig unklar, welcher Anteil direkt bei der Verklappung verdriftet ist. An anderer Stelle schreibt Gruß: „Zwischen dem in den Schuten ermittelten Volumen und der August 2001 Messung ist eine Differenz von -423 m<sup>3</sup> ermittelt worden. Dieser Wert liegt unter der Volumengenauigkeit von +/- 510 m<sup>3</sup>. Daher werden die Verdriftung in der Wassersäule bei der Verklappung sowie die Verlagerung von Mergel zwischen Juni und August 2001 mit 0 angenommen.“ Auch an dieser Stelle sind die von Prof. Dr. Schüttrumpf angeführten Aussagen irreführend und stehen zudem nicht in einem sinnvollen Kontext zu den in der Auswirkungsprognose getroffenen Aussagen: die Arbeit von Gruß lässt keine Schlüsse auf konkrete Sedimentfreisetzungsraten bei der Verklappung zu.

Und selbst wenn dem so wäre, könnten solche Raten nicht auf die Arbeiten im Fehmarnbælt übertragen werden, da die Freisetzungsvorgänge nicht vergleichbar sind.

### **3.7 Modell zur Badegewässerqualität**

*„Zum Nachweis der Badewasserqualität finden sich in den Unterlagen keine neuen Anmerkungen. Weder die Badesaison noch die schlechtesten Wasserqualitätswerte in der Ostsee treten im November auf. Somit ist die Vorgehensweise nicht nachvollziehbar und unzulässig.“*

#### **Zusammenfassung der Stellungnahme**

Die Kritik Prof. Dr. Schüttrumpfs zu der Prognose, wie sich das Vorhaben auf die Badegewässerqualität auswirken kann, geht ins Leere. In Deutschland werden keine vorhabenbedingten Maßnahmen geplant, die sich nachteilig auf die Badegewässerqualität, wie sie nach den bestehenden gesetzlichen Vorgaben zu sichern ist, auswirken können.

#### **Stellungnahme**

Die Badegewässerqualität wird anhand bestimmter pathogener Mikroorganismen in den betreffenden Gewässern bestimmt (siehe § 4 i.V.m. Anl. 2 der Landesverordnung über die Qualität und die Bewirtschaftung der Badegewässer). Übrige Merkmale, die für eine Beschreibung der Wasserqualität herangezogen werden könnten, sind für eine Einstufung eines Badegewässers im Sinne dieser Vorschrift unerheblich.

In dem angesprochenen Modell zur Badegewässerqualität (UVS, Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kap. 0.3.4.1.5.,) wird die Einleitung und Verbreitung pathogener Mikroorganismen (durch Abwasserauslässe) in den Fehmarnbelt simuliert. Der Gegenstand der Modellierung ist die Verlegung einer Einleitstelle in Dänemark. Eine Vermehrung der eingeleiteten Organismen in der Ostsee ist nach der Einleitung nicht zu erwarten. Die Wahl des Monats November stellt eine konservative Annahme dar, da die Sterberate pathogener Mikroorganismen in kälterem Wasser geringer ist. Weiterhin ist ein Transport dieser Organismen vom Auslass in die Nähe von Badegewässern in dieser hydrodynamisch aktiveren Zeit wahrscheinlicher.

Auf deutscher Seite werden keine Maßnahmen durchgeführt, die projektbedingt zu einer Einleitung oder Vermehrung pathogener Mikroorganismen in der Ostsee führen können, die für eine Einstufung der Badegewässerqualität maßgeblich wären. Demzufolge ist eine diesbezügliche Abschätzung der Vorhabenauswirkungen unter Verwendung des o. a. Modells nicht erforderlich. Die Kritik Prof. Dr. Schüttrumpfs an dem Modell geht daher ins Leere.

### 3.8 Kalibrierung des Modells zur Sedimentverdriftung

*Prof. Dr. Schüttrumpf kritisiert in seinem mündlichen Vortrag vom 29.06.2017, dass das Modell zur projektbedingten Sedimentverdriftung nicht kalibriert worden sei. Er formuliert in diesem Zusammenhang den Antrag „Es sind hydronumerische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Sedimentverdriftung auf der Grundlage eines kalibrierten Modells inkl. eines Tunnelgrabens durchzuführen, alle Ergebnisse sind darzustellen und zu bewerten.“*

#### Zusammenfassung der Stellungnahme

Die Vorhabenträger haben die eingeforderte hydrodynamische Untersuchung zu den Auswirkungen der Sedimentverdriftung vorgelegt. Sie basiert auf den eingesetzten kalibrierten und validierten Modellen. Es ist nicht erforderlich, dass die erstellten Modellierungen den Tunnelgraben berücksichtigen. Die Vorhabenträger haben nachgewiesen, dass dieser als Bauwerksstruktur weder während noch nach dem Ende der Bauphase Auswirkungen auf die Hydrographie, die Sedimentation oder die Wasserqualität haben wird (vgl. Kap. 3.1).

#### Stellungnahme

Prof. Dr. Schüttrumpf erweckt mit seiner Kritik den Eindruck, die Prognose der Sedimentverdriftung wurde ohne jegliche Modellkalibrierung durchgeführt. Das ist nicht korrekt. Die Modellierung des Sedimenttransports beruht auf drei Teilmodellen: einem Strömungsmodell (MIKE 3 HD), einem Seegangmodell (MIKE 21 SW) und einem Transportmodell der freigesetzten Sedimente (MIKE 3 MT) (vgl. Kap. 2.3 in diesem Dokument). Die Teilmodelle zu Strömung und Seegang wurden erfolgreich kalibriert und validiert (vgl. Kap. 3.2 in diesem Dokument und UVS, Anhang A Methodik, Kapitel 0.1.2.2.3.4., S. 45ff.). Diese Modelle beschreiben die die Sedimentverdriftung verursachenden Prozesse.

Das Teilmodell zum Transport der Sedimente betrachtet die projektbedingte Freisetzung und Verdriftung. Eine Kalibrierung und Validierung an Naturdaten ist vor der eigentlichen Baumaßnahme nicht in vergleichbarem Umfang wie bei den anderen beiden Teilmodellen möglich, da die notwendigen Messwerte erst während der Sedimentfreisetzung gewonnen werden können.

Die Parameter im Teilmodell Sedimenttransport wurden durch Bestimmung der Bodenarten entlang der Tunneltrasse, Labor- und Felduntersuchungen mit Standortsedimenten sowie aus Literatur- und Erfahrungswerten ermittelt.

Die Sedimente entlang der Tunneltrasse können vor Baubeginn beprobt und zur Parametrisierung der Sedimenteigenschaften im Modell verwendet werden. Dies ist sowohl zur Bestimmung der Bodenarten und Korngrößenverteilung geschehen (vgl. Kap. 4.4 in diesem Dokument) als auch zur Messung der Sinkgeschwindigkeiten der frei gesetzten Sedimente. Im Modell MIKE 3 MT werden 5 Korngrößenfraktionen verwendet, die die gesamte Spannbreite der beim Grabenaushub angetroffenen Bodenarten abbilden (vgl. Kap. Kap. 2.3 in diesem Dokument). Für jede dieser 5 Fraktionen wurde in Labor und Feldversuchen eine Sinkgeschwindigkeit ermittelt (siehe Tabelle 1).

Neben der Sinkgeschwindigkeit sind die kritischen Schubspannungen für Deposition und Erosion bestimmend für die Beschreibung der Sedimentverdriftung. Eine messtechnische Bestimmung dieser Parameter ist nur unter Laborbedingungen an ungestörten Bodenproben möglich und eventuell in Forschungsvorhaben sinnvoll. Solche Messungen sind jedoch nicht Stand der Technik. Die in diesem Projekt verwendete Parametrisierung der kritischen Schubspannungen beruht auf Literaturwerten und der Erfahrung in anderen Projekten wie z.B. im Öresund (UVS, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.2., S. 818 ff.). Der Ansatz von Literatur- und Erfahrungswerten ist in einer Umweltverträglichkeitsstudie absolut angemessen.

**Tabelle 1: Modellfraktionen, Sinkgeschwindigkeiten und kritische Schubspannungen für Deposition und Erosion im Sedimenttransportmodell (MIKE 3 MT)**

Modellfraktion	Sedimentart	Sinkgeschwindigkeit [mm/s]	Kritische Schubspannung für Deposition [N/m <sup>2</sup> ]	Kritische Schubspannung für Erosion** [N/m <sup>2</sup> ]
1*	Mittelgrober Sand	15	-	-
2	Feinsand / Schluff	2,9	0,3	0,3
3	Tone	0,56	0,07	0,3
4	Tone	0,07	0,06	0,3
5	Tone	0,03	0,05	0,3

\* Modellfraktion 1 wurde in der Verdriftungsmodellierung nicht berücksichtigt, vgl. Kap. 2.3

\*\* Die kritische Schubspannung für Erosion ist für alle Fraktionen gleich. In Bereichen mit marinem Bewuchs wird eine Schubspannung über 0,3 N/m<sup>2</sup> angesetzt (vgl. Abbildung 0-246 in UVS, Anhang B Methodik, S. 822).

DHI konnte vergleichbare Modellansätze mit der MIKE Software bereits in mehreren Projekten in der Westlichen Ostsee und anderen Meeresgebieten anwenden und die Modellqualität in Monitoringkampagnen erfolgreich überprüfen (vgl. Anhang, Tabelle 6).

Zusammen mit den kalibrierten und validierten Teilmodellen zu Strömung und Seegang bildet die vorgenommene Parametrisierung der standortspezifischen Sedimente im Transportmodell eine tragfähige Grundlage zur Prognose der Projektwirkungen Schwebstoffe und Sedimentation. Eine darüber hinausgehende Kalibrierung der Modelle ist nicht notwendig.

Die Einbindung des Tunnelgrabens in die Modelle zur Sedimentverdriftung ist nicht notwendig, da dadurch keine Änderung in der naturschutzfachlichen Bewertung zu erwarten ist. Eine Herleitung dieser Begründung wird in Kap. 3.1 in diesem Dokument gegeben.

### 3.9 Kumulation der natürlichen und projektbürtigen Schwebstoffe und Sedimentation

*Im mündlichen Vortrag während des Erörterungstermins am 29.06.2017 kritisiert Prof. Dr. Schüttrumpf, dass die Bewertung der vorhabenbedingten Umweltauswirkungen die natürlichen Schwebstoffe und Sedimentation unberücksichtigt lässt. Die projektbedingt und natürlicherweise in der Westlichen Ostsee auftretenden Schwebstoffkonzentrationen und Sedimentationen seien kumulativ zu betrachten. Es sei denkbar, dass vorhabenbedingt zu der jeweils vorhandenen Grundlast etwas dazu komme und damit dann bestimmte Wirkschwellen überschritten werden.*

#### Zusammenfassung der Stellungnahme

Für die zutreffende Bewertung der Auswirkungen, die von den Projektwirkungen Schwebstoffe und Sedimentation verursacht werden, war es nicht erforderlich, die natürlichen Schwebstoffkonzentrationen und die natürliche Sedimentation kumulativ zu betrachten. Die geforderte Betrachtung würde nicht zu anderen oder größeren Umweltauswirkungen führen, die für die Vorhabenzulassung zu berücksichtigen wären.

#### Stellungnahme

Das Verhältnis der natürlichen zu den vorhabenbedingten Schwebstoffkonzentrationen ist in Kapitel 3.2.1.3. des wasserrechtlichen Fachbeitrags (Anlage 20 der Planänderungsunterlagen) dargelegt. Daraus ergibt sich, dass die natürlichen Ereignisse, die zu erhöhten Schwebstoffkonzentrationen führen, etwa 6-50 Mal häufiger sind als die projektbedingten. Die Schlussfolgerung im wasserrechtlichen Fachbeitrag ist: „Kumulativ betrachtet ergeben sich Konzentrationen, die auch natürlicherweise innerhalb von Sturmereignissen auftreten und mehrere Tage anhalten können“ (S. 172). Die natürlichen Sedimentationsraten (1-2 mm pro Jahr) sind in weiten Bereichen der endgültigen Sedimentationsgebiete etwa zehn Mal so hoch wie die projektbedingte Sedimentation (1 mm insgesamt am Ende der Bauphase, also 1 mm in 6,5 Jahren, entspricht 0,15 mm pro Jahr) (vgl. Anlage 20 der Planfeststellungsunterlagen, Kapitel 3.2.1.4.). Für die Projektwirkungen Schwebstoffe und Sedimentation wird auf dieser Grundlage nicht davon ausgegangen, dass eine Kumulation mit den jeweiligen natürlichen Hintergrundkonzentrationen oder -raten stattfindet, die zu einer anderen Auswirkungsprognose als in den Planfeststellungs- und Planänderungsunterlagen führen würde. Hinzu kommt, dass eine Kumulation nicht zu jeder Zeit und unter beliebigen Umständen auftreten könnte.

Demzufolge kann weder die natürliche Schwebstoffkonzentration noch die natürliche Sedimentation einfach zu den entsprechenden Projektwirkungen hinzu addiert werden. Dies wird im Folgenden erläutert:

#### Schwebstoffe

Die Schwebstoffe werden zu jeder Zeit definitionsgemäß im Wasser als Partikel transportiert. Sie schweben im Wasser und werden mit dem Wasser mitbewegt, bis sie an einem Ort absedimentieren. Je kleiner die Sedimentpartikel sind, desto länger können diese von

Wasser transportiert werden, ehe sie sich am Meeresboden ablagern. Die Sandfraktion hingegen ist durch große Partikel charakterisiert. Diese sind so schwer, dass sie durch Wasserströmungen im Meer nicht in Schwebelage gehalten werden können. Sie sedimentieren sofort und kontinuierlich ab und verdriften daher kaum (maximal wenige hundert Meter, abhängig von der Wassertiefe).

Eine Kumulation der Schwebstofffraktionen mit den vorhandenen Schwebstoffen im Wasser könnte nur dann stattfinden, wenn in ein gegebenes Wasservolumen, welches natürliche Schwebstoffe enthält, projektbedingt zusätzliche Schwebstoffe eingebracht werden. Dazu müsste das Sediment (vom Baggergerät) im Idealfall im trockenen Zustand beigegeben werden. Nur dann kann das zusätzliche Sediment in das vorhandene Wasservolumen eindringen, ohne es gleichzeitig zu verdrängen.

Der maßgebliche Effekt bei den Baggerarbeiten, der zusätzliches Sediment in das Wasser bringt, ist der Sedimentüberlauf von einer Baggerschaukel in Form eines Wasser-Sediment-Gemisches. Es wird also Wasser, welches durch die Schaukel aus dem Meer gehoben wird, gemeinsam mit dem gebaggerten Sediment zurück in das Wasser eingetragen. Das führt zu einer Vermischung von zwei Wassermassen mit unterschiedlichen Konzentrationen von Schwebstoffen und mit unterschiedlichen Volumina. Eine solche Vermischung kann physikalisch nur dazu führen, dass die Endkonzentration der gelösten Stoffe zwischen denjenigen Konzentrationen der Ausgangs-Wassermassen liegt.

Direkt nach der Freisetzung vermischen sich also die beiden Wassermassen durch Turbulenz. Das vorhandene Umgebungswasser hat meist eine deutlich geringere Schwebstoffkonzentration als das Wasser-Sediment-Gemisch aus dem Überlauf. Die Vermischung mit dem Überlauf resultiert daher in einer Schwebstoffkonzentration, welche zwischen derjenigen des Überlaufs und der Hintergrundkonzentration liegt. Das Verdriftungsmodell lässt die natürlichen Schwebstoffkonzentrationen außen vor. Es arbeitet nur mit der Konzentration der projektbedingt eingetragenen Sedimente. Durch die sofortige und ständige Verdriftung durch Advektion und Diffusion sowie durch Sedimentation werden die kurzfristig erhöhten Schwebstoffkonzentrationen beständig verringert. Das getrübt Wasser wird mit der Meeresströmung abtransportiert und verteilt sich im Umgebungswasser. Das bedeutet auch, dass an den Ort der Baggerung (der sich nicht mit der Strömung fortbewegt), ständig Wasser aus Bereichen nachströmt, welches bisher nicht unmittelbar von der Baggerung betroffen war. Dadurch kann es nicht dazu kommen, dass die Schwebstoffkonzentration des Wassers an der Baggerstelle durch kontinuierliches Baggern immer weiter ansteigt und so eine Kumulation von Konzentrationen verursacht. Insgesamt kann es daher nach der initialen Freisetzung im offenen Wasser nicht mehr zu einer nachfolgenden Kumulation mit der Hintergrundkonzentration des Umgebungswassers kommen mit der Folge wieder ansteigender Schwebstoffkonzentrationen.

Selbst wenn Wasser mit einer projektbedingt erhöhten Schwebstoffkonzentration andernorts auf Wasser trifft, welches z.B. durch ein Sturmereignis stark getrübt ist, können sich die Schwebstoffkonzentrationen nicht addieren. Dazu müssten nämlich sich die Sedimentpartikel in der einen Wassermasse gezielt in die andere Wassermasse bewegen ohne jedoch Wasser mitzunehmen, um dort die Konzentration zu erhöhen. Da aber die Partikel nur

mit dem Wasser transportiert werden und sich nicht unabhängig vom Wasser bewegen können, kann auch hier eine Vermischung der Wassermassen nur zu einer Endkonzentration führen, die zwischen den beiden Ausgangskonzentrationen liegt. Eine Addition ist nicht möglich.

### *Sedimentation*

Nur wenn das durch die Baggerarbeiten des Vorhabens getrübe Wasser in Bereiche kommt, in denen (strömungsbedingt durch Wind oder Wellen) eine Resuspension vom Meeresboden stattfindet, kann dort die Schwebstoffkonzentration lokal wieder ansteigen. Bei der Resuspension wird Sediment durch eine hohe Schubspannung und Turbulenz am Meeresboden in das Wasser gebracht (aufgewirbelt), ohne dass es vorher bereits im Wasser gelöst war. Das Wasser nimmt also mehr Sediment auf, ohne gleichzeitig seine Wassermenge zu erhöhen. Dadurch steigt die Konzentration an. Das ist typischerweise im flachen Küstenbereich und meist im Winter bei Starkwind und Sturm der Fall.

Dabei ist die Herkunft des resuspendierten Materials – natürlich oder vorhabenbedingt – von untergeordneter Bedeutung. Bei der Resuspension wird durch die bodennahe Strömung zunächst die oberste Sedimentschicht ‚aufgewirbelt‘, d.h. es werden diejenigen Sedimente in die Wassersäule eingebracht, die sich zuletzt abgelagert haben. Dies können projektbürtige oder Sedimente aus dem natürlichen und vorhabenunabhängigen Sedimenttransport sein. Danach werden in Abhängigkeit von Stärke und Dauer des Resuspensionsereignisses nach und nach weitere Sedimentschichten abgetragen. Durch wiederholte Ablagerung und Wiederaufwirbelung findet eine Verschmischung der Schichten und somit auch der projektbürtigen und natürlich vorhandenen Sedimente statt (vgl. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang C, Kapitel 4.2.4.2., S. 98). Die Schubspannung am Meeresboden sorgt je nach ihrer Stärke für die Resuspension einer bestimmten Menge Sediments. Die Gesamtmenge des resuspendierten Sediments in der Wassersäule wird also nicht allein dadurch größer, dass neben dem natürlichen Sediment noch projektbedingtes Sediment an der gleichen Stelle vorhanden ist.

Für die Sedimentation folgt daraus, dass die Sedimentationsrate an einem bestimmten Ort abhängig ist von der Menge und vertikalen Lage des Sedimentes im Wasser darüber und dessen Korngrößenzusammensetzung, sowie von der Stärke der Strömung und einer etwaigen Turbulenz. Die Herkunft des Materials spielt dabei keine Rolle. Eine Kumulation natürlicher und projektbedingter Sedimentation kann in Bezug auf die Sedimentationsrate nicht stattfinden. Dazu müsste Sediment des Vorhabens und natürlich vorkommendes Sediment gleichzeitig und unabhängig voneinander am gleichen Ort sedimentieren. Das ist jedoch physikalisch nicht möglich. Das sedimentierende Material wird also immer eine bestimmte Mischung projektbedingter und natürlicher Sedimente sein, die der obigen Darstellung entsprechend in Form von Schwebstoffen entsteht.

## 4. Punkte aus bisherigen Sachverhaltsermittlungen

Die Planfeststellungsbehörde hat in der Vorbereitung dieser Sachverhaltsermittlung offene Fragen bzw. Unklarheiten in bereits vorliegenden Sachverhaltsermittlungen und den dazugehörigen Antworten der Vorhabenträger aufgezeigt. Dies sind insbesondere die Punkte 13 und 14 sowie 16 bis 19 der Sachverhaltsermittlung vom Juli 2014, die Antworten der Vorhabenträger dazu vom August 2015, die weiteren Nachfragen vom Dezember 2015 und die Antworten der Vorhabenträger darauf vom März 2016.

- Punkt 13: Grabenauflösung in den numerischen Modellen (Kapitel 4.1)
- Punkt 14: Aussagen zu Sauerstoffmangelsituationen im Graben (Kapitel 4.2)
- Punkt 16: Wiederverfüllung des Tunnelgrabens, Erosions- und Kolkungsprozesse über der Tunnelabdeckung (Kapitel 4.3)
- Punkt 17: Sedimentfreisetzung bei Baggergut (Freisetzungsraten, Sedimentzusammensetzung) (Kapitel 4.4). In Kapitel 4.4. werden die Grundlagen für die Ermittlung der Projektwirkungen Schwebstoffe im wasserrechtlichen Fachbeitrag und die Eingangsdaten der Sedimenttransportberechnungen dargestellt.
- Punkt 18: Berücksichtigung von Sedimenten im offenen Graben (Kapitel 4.5)
- Punkt 19: Herleitung der Wirkschwellen bei benthischer Flora (einschließlich der Gleichverteilung von Sedimentationsereignissen über das Jahr) (Kapitel 4.6)

## 4.1 Punkt 13: Grabenauflösung in den numerischen Modellen

### Sachverhaltsermittlung Juli 2014:

„Soweit nachvollziehbar, sind die eigentlichen Bauwerke der Brücke und der Graben des Absenktunnels im mehrjährigen Bauzustand in den numerischen Modellen nicht aufgelöst worden. Dies muss in seinen Konsequenzen diskutiert und ggfls. zumindest für den, soweit in den Unterlagen nachvollziehbar, ca. 19 km langen, mehr als 42 m breiten, mehr als 11 m tiefen und bis zu 4 Jahre bestehenden Tunnelgraben nachgeholt werden.“

### Stellungnahme LBV Dezember 2015:

„Der Tunnelgraben wurde im Rahmen der Planänderung nachmodelliert, in der Erwiderung sind festgestellte Auswirkungen in Teilen abgebildet. Die methodische Herangehensweise, die gewonnen Erkenntnisse und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die abiotischen und biotischen (Teil)Schutzgüter sind in den Planänderungsunterlagen aufzunehmen. Auf die Punkte 2 und 12 wird in diesem Zusammenhang verwiesen.“

### Antwort:

Die Auswirkungen infolge des offenen Tunnelgrabens werden in Anlage 30.3. der Planänderungsunterlagen dargelegt. Zunächst werden dort in Kap. 3.1. und 3.2. die für einen Wasseraustausch im Graben bedeutenden hydrodynamischen Rahmenbedingungen beschrieben und erläutert (vgl. hierzu auch dieses Dokument Kap. 3.1). Kap. 3.3. in Anlage 30.3 beschreibt anschließend den Modellaufbau und die Modellvalidierung (vgl. zur Modellvalidierung auch dieses Dokument Kap. 3.2). Die nachfolgenden Kap. 3.4. bis 3.8. in Anlage 30.3 befassen sich mit den möglichen Auswirkungen auf die Wasserqualität im Graben und im Grabenumfeld sowie den damit möglicherweise einhergehenden Folgewirkung auf die benthische Fauna und Fische. Diese Ausführungen sind zudem Grundlage für die spezifischen naturschutzfachlichen Fragestellungen in Anlage 12, Anlage 15, Anlage 19 sowie Anlage 20:

- Anlage 12, Kap. 6.3.2.1. (S. 601, Beeinträchtigungen der Wasserqualität infolge veränderter Hydrografie im Bereich des offenen Tunnelgrabens (baubedingt), Kap. 6.4.3. (S. 660, Beeinträchtigungen von Tieren durch Änderung der Wasserqualität (u. a. Schwefelwasserstoff) im Bereich des offenen Tunnelgrabens (baubedingt))
- Anlage 15, Teil C, Kap. 4.2.6 (S. 102, Auswirkungen des offenen Tunnelgrabens auf Hydrographie, Wasserqualität und Biologie)
- Anlage 19, Teil A, Kap. 6.2.1.2.3. Reduktion des in der Wassersäule gelösten Sauerstoffs
- Anlage 20 Kap. 3.2.1.6. (S. 180, Projektwirkungen – Sauerstoffzehrung) , 5.7.1.3.5.(S. 365, Auswirkungen auf das Küstengewässer Fehmarnbelt - Sauerstoffzehrung, 5.7.7.2.5 (S. 440, Auswirkungen auf das Küstenmeer – Sauerstoffzehrung), 6.6.2 (S. 557, Auswirkungen auf die Merkmale des Meeressgewässers Deutsche Ostsee)

Mit der Fragestellung der Berücksichtigung des offenen Tunnelgrabens während der Bauzeit befasst sich Kap. 3.1 dieses Dokuments. Dort wird dokumentiert, dass die Aussagen in

Anlage 30.3 valide und belastbar sind. Darüber hinaus wurden keine weiteren Anmerkungen formuliert.

### 4.2 Punkt 14: Aussagen zu Sauerstoffmangelsituationen im Graben

#### Sachverhaltsermittlung Juli 2014:

„Die Feststellung, dass „...die baubedingten Änderungen der Hydrografie aller Varianten keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserqualität...“ (Anlage 15 UVS, S. 2725) haben, ist nicht ausreichend begründet. So ist eine Ausbildung von Sauerstoffmangelsituationen im immerhin über 4 Jahre offenen Absenktunnelgraben, in dem sich feinkörnige Sedimente akkumulieren werden, nicht ohne Prüfung auszuschließen. Die o.g. Feststellung ist zu überprüfen und das Ergebnis nachvollziehbar darzustellen.“

#### Stellungnahme LBV Dezember 2015:

„Die Aussage der Erwiderung, dass die Vorhabenträger an der zitierten Aussage in der UVS (Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Kapitel 8.3.2.1., Seite 2725) festhalten erstaunt, da diese ausschließlich auf anlagebedingten Aspekten fußt. Die Bedeutung bauzeitlicher Zustände bei der Absenktunnelvariante und die Nichtberücksichtigung wurden bei den vorherigen Punkten mehrfach deutlich gemacht. Der Verweis auf die Ergebnisse in Punkt 13 der Erwiderung macht dies ebenfalls deutlich. Für den Tunnelbereich werden ein reduzierter Wasseraustausch, ein Sedimentfalleneffekt für feines Material, die Entwicklung von Sauerstoffmangelsituationen, die Freisetzung von Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), negative Auswirkungen auf die Wasserqualität und eine erhöhte Mortalität von Fischen und Benthosorganismen als mögliche Projektwirkungen angeführt. Die genannten Aspekte und ihre Auswirkungen sind bisher in den Planfeststellungsunterlagen (UVS, LBP, FFH, ggf. Artenschutz) nicht im notwendigen Detaillierungsgrad abgebildet, was im Rahmen der Planänderung nachzuholen ist.“

#### Antwort:

Auf die Ausbildung von Sauerstoffmangelsituationen und die Entstehung sowie Freisetzung von Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) im zeitweise offenliegenden Tunnelgraben wurde in der Antwort auf die Stellungnahme Dezember 2014 im August 2015 unter Punkt 13 eingegangen. Daraufhin wurde die Planfeststellungsunterlagen um Anlage 30.3. ergänzt. Hier werden in Kap. 3.1. und 3.2. zunächst die für einen Wasseraustausch im Graben bedeutenden hydrodynamischen Rahmenbedingungen beschrieben und erläutert (vgl. hierzu auch dieses Dokument Kap. 3.1). Kap. 3.3. beschreibt anschließend den Modellaufbau und die Modellvalidierung (vgl. hierzu auch dieses Dokument Kap. 3.2). Die nachfolgenden Kap. 3.4. bis 3.8. befassen sich dann ausführlich mit den in Punkt 13 der Antwort der Vorhabenträger zur Stellungnahme Juli 2014 angesprochenen Aspekten:

- Wasseraustausch im Tunnelgraben im Sommer (Kap. 3.4.)
- Verdünnung des Grabenwassers bei Überlauf (Kap. 3.5.)
- Ansammlung organischen Materials im Graben (Kap. 3.6.)
- Auswirkungen von H<sub>2</sub>S-Konzentration auf Wasserqualität und Biologie sowie Modellierung von H<sub>2</sub>S-Konzentration (Kap. 3.7. und 3.8.)

Betrachtet und modelliert wird dabei sowohl der Graben für ein Standardelement als auch der Grabenausschnitt für ein Spezialelement.

Nachfolgend werden die wesentlichen Aussagen bzw. Inhalte der Kapitel 3.4. bis 3.8 zusammenfassend dargestellt.

### *Wasseraustausch im Tunnelgraben im Sommer*

Der Sommer wurde als kritischer Zeitraum identifiziert, da stagnierende Bedingungen vorherrschen, die Sohlströmungen am geringsten sind und die Wassertemperaturen ihren Maximalwert erreichen. Für beide Tunnelelementtypen zeigen die Modellergebnisse, dass es zu einer Schichtung des Wassers im Tunnelgraben mit zunehmenden Salzgehalten in Richtung der Grabensohle kommen kann. Gleichzeitig weist die nicht dauerhaft bestehende Schichtung auf einen geringen Wasseraustausch auch am Grabengrund hin.

### *Verdünnung des Grabenwassers bei Überlauf*

Die Verdünnung des Grabenwassers wurde mittels eines Tracers, der am Grabengrund in konstanter Rate zugeführt wird, modelliert. Die Konzentration des Tracers baut sich innerhalb des Grabens in Perioden mit geringem Wasseraustausch auf und wird dann bei Austauschereignissen reduziert. Stromab des Grabens kann der Tracer in mit der Entfernung abnehmender Konzentration aufgrund regelmäßiger Erosion des Grabenwassers nachgewiesen werden. Es wurden Verdünnungsfaktoren von 20 im Nachbereich des Grabens (20 m) bis hin zu 90 in 4000 m Entfernung ermittelt.

### *Ansammlung organischen Materials im Graben*

Im Zuge der Untersuchungen im Bereich des Testfeldes (vgl. Beschreibung des Testfeldes in Kap. 3.5) konnten Ablagerungen von organische Materialien, Schlick und zu einem geringen Anteil Sand festgestellt werden. Die jährliche Sedimentationsrate erreichte eine Mächtigkeit von bis zu 30 cm. Im Bereich des Tunnelgrabens wird es während der Bauphase ebenfalls zu Ablagerungen kommen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich im Testfeld mehr Material pro m<sup>2</sup> Grundfläche ablagerte als dies im Tunnelgraben der Fall sein wird. Dies ist damit zu begründen, dass beim Testfeld ein Sedimenteintrag zum einen durch die längs gerichtete Strömung und zum anderen auch durch quer gerichteten Strömungen erfolgte, während beim Tunnelgraben ein Sedimenteintrag lediglich über die längs gerichtete Strömung erfolgen kann.

### *Auswirkungen und Modellierung der H<sub>2</sub>S-Konzentration*

Das höchste Risiko von stehendem Wasser, Sauerstoffmangelsituationen und der Entstehung von H<sub>2</sub>S besteht im Sommer. Basierend auf Literaturstudien, die für die Schwefelwasserstoffentstehung Raten von bis zu 1 g H<sub>2</sub>S/m<sup>2</sup>/Tag angeben, wird die H<sub>2</sub>S-Produktion über der gesamten Sohle des tiefen Grabens für Spezialtunnelelemente (40 m × 50 m) mit einer Rate von 1 g H<sub>2</sub>S/m<sup>2</sup>/Tag angenommen. An der Sohle des Tunnelgrabens erreicht die modellierte Konzentration während Stagnationsperioden bis zu 10–20 mg H<sub>2</sub>S/l. Bei Spülereignissen sinkt die Konzentration am Grund des Grabens auf 0,1 bis 0,2 mg H<sub>2</sub>S/l. Von September bis November wird der Graben alle 1–2 Wochen gespült.

Außerhalb des Grabens in etwa 20 m Entfernung (stromab) werden die 48-Stunden-gemittelten Konzentrationen nach Spülereignissen im sohlnahen Wasser 0,005–0,02 mg H<sub>2</sub>S/l

erreichen. Sie liegen damit unter den in der Literatur dokumentierten kritischen Konzentrationen für typische benthische Wirbellose des Fehmarnbelt. Die im Fehmarnbelt vorkommenden Grundfischarten werden in ihrer natürlichen Umgebung gelegentlich geringen Schwefelwasserstoff-Konzentrationen ausgesetzt. Sie sind zudem im Unterschied zu den benthischen Wirbellosen hochmobil und daher in der Lage eine toxischen Gefährdung zu meiden. Für tropische und subtropische Fische wird eine H<sub>2</sub>S-Konzentration von 0,05 mg/l H<sub>2</sub>S angenommen. Eine solche Konzentration wird bereits 20 m stromab des Grabens unterschritten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Auswirkungen auf benthische Fauna und Fische infolge von erhöhten H<sub>2</sub>S-Konzentrationen im Tunnelumfeld auszuschließen sind.

Eine entsprechende naturschutzfachliche Bewertung findet sich unter dem Wirkfaktor Sauerstoffzehrung auch in den folgenden Teilunterlagen der Planänderungsunterlagen:

- Anlage 12, Kap. 6.3.2.1. (S. 601, Beeinträchtigungen der Wasserqualität infolge veränderter Hydrografie im Bereich des offenen Tunnelgrabens (baubedingt), Kap. 6.4.3. (S. 660, Beeinträchtigungen von Tieren durch Änderung der Wasserqualität (u. a. Schwefelwasserstoff) im Bereich des offenen Tunnelgrabens (baubedingt))
- Anlage 15, Teil C, Kap. 4.2.6 (S. 102, Auswirkungen des offenen Tunnelgrabens auf Hydrographie, Wasserqualität und Biologie)
- Anlage 19, Teil A, Kap. 6.2.1.2.3. Reduktion des in der Wassersäule gelösten Sauerstoffs
- Anlage 20 Kap. 3.2.1.6. (S. 180, Projektwirkungen – Sauerstoffzehrung) , 5.7.1.3.5.(S. 365, Auswirkungen auf das Küstengewässer Fehmarnbelt - Sauerstoffzehrung, 5.7.7.2.5 (S. 440, Auswirkungen auf das Küstenmeer – Sauerstoffzehrung), 6.6.2 (S. 557, Auswirkungen auf die Merkmale des Meeresgewässers Deutsche Ostsee)

Mit der Fragestellung der Berücksichtigung des offenen Tunnelgrabens während der Bauzeit befasst sich Kap. 3.1 dieses Dokuments. Dort wird dokumentiert, dass die Aussagen in Anlage 30.3 valide und belastbar sind.

Aus Kapitel 3.1 dieses Dokuments ergibt sich ebenfalls, dass die Ergebnisse zur Wasserqualität aus Anlage 30.3 valide sind.

### **4.3 Punkt 16: Wiederverfüllung des Tunnelgrabens, Erosions- und Kolkungsprozesse über der Tunnelabdeckung**

#### **Sachverhaltsermittlung Juli 2014:**

*„Der Absenktunnel wird mit einer Steinschutzschicht von 1,2 m Mächtigkeit, deren Oberfläche 0,7 m unter dem natürlichen (jetzigen) Meeresbodenniveau liegt abgedeckt. Eine Abdeckung mit Sanden ist nicht vorgesehen, sondern es wird eine natürliche, über viele Jahre verlaufende Selbstverfüllung erwartet. Es fehlen Aussagen zu den Wahrscheinlichkeiten, dass zumindest Teile der Steinabdeckung auch langfristig ohne eine solche natürliche Selbstverfüllung als Hartsubstrate die Siedlungsfläche für das Benthos bilden werden. Mögliche Erosions- und Kolkungsprozesse werden nicht thematisiert. Die fehlenden Aussagen sind zu ergänzen.“*

#### **Stellungnahme LBV Dezember 2015:**

*„Die Erwiderung liefert zusätzliche Informationen, die bisher in den Unterlagen nicht enthalten waren. Die Aussagen sind in den aktualisierten Planfeststellungsunterlagen (insbesondere LBP) zu übernehmen. Die Ausführungen der Erwiderung machen allerdings auch deutlich, dass nicht auszuschließen ist, dass in Teilbereichen über einen längeren Zeitraum Hartsubstrat als obere Sedimentschicht ansteht. In diesem Zusammenhang wird eine erhebliche Beeinträchtigung benthischer Habitats festgestellt, eine erhebliche Beeinträchtigung der benthischen/demersalen Fischfauna hingegen nicht (Anlage 12, S. 680). Dieser Widerspruch ist aufzulösen.*

*Die Aussagen der Erwiderung machen zudem deutlich, dass die der UVS zugrunde liegende Annahme zum Bauwerksendzustand mit einer 0,7 m tiefen Grabenmulde so nicht zutrifft. Es werden in der Erwiderung Bauwerksendzustände eingeführt, die u.E. so bisher nicht Grundlage der Planfeststellungsunterlagen waren (Tiefe der verbleibenden Grabens bis 1,4 m, in Teilabschnitten > 1,5 m, durchschnittliche Tiefe 0,9 m). Die Unterlagen sind dahingehend anzupassen.“*

#### **Antwort:**

In den Planänderungsunterlagen wurde die Beschreibung und Bewertung der möglichen Auswirkungen auf die Fischfauna infolge des Einbringens von Hartsubstrat sowie der temporär offenliegenden Hartsubstratflächen in Anlage 12 ergänzt. In Kap. 6.4.3 (S. 650) findet sich dort unter Bezugnahme auf aktuelle Erkenntnisse aus anderen Vorhaben eine Beschreibung der zu erwartenden Auswirkungen, die als nicht erheblich im Sinne der Eingriffsregelung gewertet werden.

Die Darstellung der Grabenquerschnitte in Anlage 9.1, Blatt 1 der Planänderungsunterlagen wurden zudem um Angaben zu den zu verfüllenden Abschnitte (Angaben in Bau-km) inkl. Angaben zu erforderlichen Verfüllhöhen ergänzt.

In Anlage 12, Anhang I A der Planänderungsunterlagen wurde Maßnahmenblatt 8.6 M aufgenommen. In diesem Maßnahmenblatt wird mit Verweis auf Anlage 9.1, Blatt 1 die ergänzende Wiederverfüllung als Minimierungsmaßnahme festgeschrieben. Diese Minimierungsmaßnahme wird auch in den weiteren naturschutzfachlichen Unterlagen berücksichtigt:

- Anlage 15, Teil C, Kap. 4.2.5.1. (S. 100, Ermittlung der natürlichen Wiederverfüllung des Tunnelgrabens)
- Anlage 19, Teil A, Kap. 6.1.4. (S. 49 f. Beschreibung des Bauverfahrens)
- Anlage 20 Kap. 3.1.3.3. (S. 137f., Rückverfüllung des Tunnelgrabens und Errichtung der Geröllabdeckung)

Weitere Erläuterungen zur Regeneration des Meeresbodens und zur Wiederverfüllung des Tunnelgrabens werden in Kap. 3.5 gegeben.

## 4.4 Punkt 17: Sedimentfreisetzung bei Baggergut (Freisetzungsraten, Sedimentzusammensetzung) sowie Eingangsdaten der Sedimenttransportberechnung

### Sachverhaltsermittlung Juli 2014:

„Die Sedimentfreisetzung während der verschiedenen Baggerungen, also der Teil des Baggergutes der in Suspension geht, wird im Hauptvariantenvergleich für den Absenktunnel mit 3,5%, für die Brückenvariante mit 5 bzw. 12,5% angesetzt. Eine fachliche Herleitung dieser verschiedenen Annahmen scheint in den Antragsunterlagen zu fehlen. Diese Annahmen bestimmen die Auswirkungen auf alle anderen Schutzgüter jedoch ganz wesentlich mit, so dass eine solche Herleitung Bestandteil der Antragsunterlagen werden muss. Dabei sind besonders auch die Annahmen bzgl. der Umlagerung kohäsiven Sohlmaterials zu begründen, da einerseits in Anlage 15, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 814 festgestellt wird „...die Analyse der Korngrößenverteilungen am Meeresboden zeigt einen hohen Anteil sehr feiner Fraktionen“, andererseits in Anlage 15, Methodik A, S. 103, Abs. 1 angemerkt wird „...dass für die numerische Berechnung des Sedimenttransports von einer 100% Kapazität von losem, nicht kohäsiven Sohlmaterial (hauptsächlich Sand) auf dem Meeresboden ausgegangen wird..“). Dies könnte einerseits auf eine Unterschätzung des freigesetzten Anteils hindeuten, andererseits ergeben Sedimenttransportmodelle (dem Stand der Wissenschaft entsprechend) i.d.R. für kohäsive Sedimente (toniges/schluffiges Material) unschärfere Ergebnisse; die Konsequenzen müssen in den Antragsunterlagen kritisch diskutiert werden.“

### Stellungnahme LBV Dezember 2015:

„Die aus dem Bau der Øresundverbindung transportierten Erfahrungen sind plausibel, klären die Widersprüchlichkeiten in den Antragsunterlagen jedoch nicht auf. Die Frage, warum für den Absenktunnel Sedimentfreisetzungsraten von 3,5% und bei der Brückenvariante von 5 bzw. 12,5% angesetzt wurden, bleibt weiterhin unbeantwortet. Führt man sich die beiden Bauverfahren vor Augen, die im selben Naturraum liegen, ist dies nicht plausibel.

Da die Sedimentfreisetzungsraten die Grundlage für die Auswirkungsprognose verschiedenster (Teil)Schutzgüter darstellen, sind diese von entsprechender Tragweite und somit nachvollziehbar in den Planfeststellungsunterlagen auszuführen.

Mit gleicher Begründung ist weiterhin aufzuklären, wie mit der Problematik des kohäsiven Sohlmaterials umgegangen wurde. Wie schon in der Sachverhaltsermittlung vom 28.07.2014 ausgeführt, wird in den Planfeststellungsunterlagen festgestellt, dass die Analyse der Korngrößenverteilungen am Meeresboden einen hohen Anteil sehr feiner Fraktionen zeigt (Anlage 15, Kap. 0.3.4.1.4.1., S. 814). Anlage 15 Methodik A, S. 103, Abs. 1 führt hingegen aus, dass für die numerischen Berechnungen des Sedimenttransportes von einer 100% Kapazität von losen, nicht kohäsiven Sohlmaterial (hauptsächlich Sand) ausgegangen wird. Mit den Hinweisen auf einen hohen Feinkornanteil (kohäsives Material) muss derzeit davon ausgegangen werden, dass die Sedimentfreisetzungsraten und Sedimenttransportprozesse mit den daraus resultierenden Auswirkungen in ihrer räumlichen und zeitlichen Dimension unterschätzt sind. Dies ist in den Antragsunterlagen aufzuklären und ggf.

in den jeweiligen Auswirkungsprognosen (UVS, LBP, FFH, Artenschutz) zu berücksichtigen.

Beispiele (nicht vollständig) aus den schutzgutbezogenen Auswirkungsprognosen“

- Ausführungen in Kap. 8.3.3.1 (Morphologie/Sedimente) legen den Schluss nahe, dass kohäsives Material, welches vorzugsweise in strömungsberuhigten Bereichen akkumuliert, nicht berücksichtigt wurde (Anlage 15, Band IV B, S. 2781 bis 2785).
- Kap. 8.3.5.1.2 (Beeinträchtigung von planktischer Fauna und Flora durch Sedimentation) führt pauschalisiert und ohne Begründung aus, dass Beeinträchtigungen nur auf dänischem Territorium auftreten (Anlage 15, Band IV B, S. 2868). Die nachfolgenden Abbildungen der Modellrechnungen (S. 2869 bis 2872) zeigen hingegen im Bestand der Chlorophyll a-Konzentrationen, der Phytoplanktonbiomasse, der Zooplanktonbiomasse und der pelagischen Primärproduktion höhere Dichten auf deutschem Territorium. Die nicht begründete Einschätzung einer Nichtbetroffenheit ist, auch vor dem Hintergrund der Freisetzung kohäsiver Sedimente, so nicht nachvollziehbar und zu begründen.
- Kap. 8.3.5.1.1 (Beeinträchtigung von planktischer Fauna und Flora durch Schwebstoffe): Ausführungen zu 8.3.5.1.2 gelten entsprechend, da nur Aussagen zum eigentlichen Tunnelgraben und das Gebiet Roodsand enthalten sind.
- Unmittelbar westlich des Fährhafens Puffgarden siedelt benthische Flora hoher bis sehr hoher Bedeutung (Anlage 15, Band IV B, S. 2886). Kap. 3.3.3.3 (Band II A, S. 252 bis 255) lässt vermuten, dass insbesondere in den küstennahen Trassenbereichen höhere Schluffanteile in den Sedimenten enthalten sind. Da die Betrachtung auf die Medianwerte der Korngrößen zielt (S. 252), wird die Einflussgröße der feinklastischen Anteile vermutlich unterschätzt. Der Vorhabenträger stellt in diesem Zusammenhang selbst „eine weit gestufte Körnungslinie....“ fest (S. 252). Eine Nichtbeeinträchtigung der benthischen Flora unter Berücksichtigung der kohäsiven Sedimente ist nicht nachvollziehbar begründet und abgebildet. Dies ist auch vor dem Hintergrund aufzuklären, dass für jede Hauptvariante jeweils nur die Baujahre mit der räumlich größten und stärksten Beeinträchtigung aufgeführt sind (S. 2888). Es ist somit davon auszugehen, dass summative Einflüsse über die gesamte Bauzeit damit nicht erfasst sind. Dies gilt sowohl für die Beeinträchtigungen durch Schwebstoffe als auch durch Sedimentation.

### **Nachtrag zur Sachverhaltsermittlung zum wasserrechtlichen Fachbeitrag**

**(31.05.2017):**

Die Planfeststellungsbehörde merkt im Nachgang zur Sachverhaltsermittlung zum wasserrechtlichen Fachbeitrag (31.05.2017) an:

„Nach der Antwort der Vorhabenträger auf diese Sachverhaltsermittlung ist u.a. weiterhin unklar, welches die Eingangsparameter für die Ermittlungen der Auswirkungen durch Schwebstoffe und Sedimentation sind. Es wird ausgeführt, dass „das numerische Modell der Sedimentverdriftung zeitlich und räumlich detailliert aufgelöste Arbeitsschritte als Eingangsparameter für die Beschreibung der Sedimentfreisetzung [nutzt]. Die einzelnen Arbeitsschritte enthalten Angaben zu Dauer, Ort, Baggertechnik, Bodenzusammensetzung, bewegtem Bodenvolumen und der Freisetzungsrate.“ In der UVS sind dann jedoch diese

*einzelnen Arbeitsschritte ausschließlich in Gruppen zusammengefasst dargestellt, die detaillierte aufgelösten Arbeitsschritte lassen sich in der UVS nicht nachvollziehen.“*

**Antwort:**

Die Vorhabenträger gehen davon aus, dass die Fragen zu den Unterschieden in den Freisetzungsraten zwischen den Bauverfahren bei der Erstellung einer Brücke bzw. eines Absektunnels zufriedenstellend erläutert wurden. Ebenso wird davon ausgegangen, dass das Missverständnis zur Nichtberücksichtigung kohäsiver Sedimente ausgeräumt werden konnte.

Aufgrund der Nachfrage zur Sachverhaltsermittlung zum wasserrechtlichen Fachbeitrag sollen nachfolgend die Eingangsdaten und –parameter der Sedimenttransportberechnung vertieft erläutert werden. Aus diesen Erläuterungen sollte die Art und Weise der Berücksichtigung der kohäsiven Sedimente ebenfalls deutlich werden.

Das numerische Modell der Sedimentverdriftung nutzt zeitlich und räumlich detailliert aufgelöste Arbeitsschritte als Eingangsparameter für die Beschreibung der Sedimentfreisetzung. Die einzelnen Arbeitsschritte enthalten Angaben zu Dauer, Ort, Baggertechnik, Bodenzusammensetzung, bewegtem Bodenvolumen und der Freisetzungsrate.

In dem Hintergrundbericht zur Modellierung der projektbedingten Sedimentverdriftung (FEHY 2013b) finden sich in Anhang A Tabellen mit der vollständigen und detaillierten Übersicht aller Arbeitsschritte für die Berechnung der Sedimentverdriftung. Diese Tabellen zeigen die Eingangsparameter in die Modellierung der projektbedingten Sedimentverdriftung, deren Ergebnisse in der UVS dargestellt und bewertet wurden.

Zwei Ausschnitte aus Anhang A sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 wiedergegeben. Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Arbeitsschritte zur Erstellung der Umschließungsdämme (containment dikes). In den folgenden Spalten werden die bewegten Materialien (material), eingesetzte Baggertechnik (equipment), die bewegten Volumen (Menge (quantity), Förderrate (production) und Dauer (time)), entstehende Freisetzung (spillage) sowie deren Volumen (volumes), Masse (weight) und Rate (weight/sec) aufgeführt. Die Abkürzungen in der Spalte Baggertechnik bedeuten: BHD (backhoe dredger) Schaufelbagger, GD (grab dredger) Greifbagger, TSHD (trailing suction hopper dredger) Laderaumsaugbagger; die Nummer hinter der Abkürzung gibt das jeweils operierende Gerät an. In Tabelle 3 werden zusätzlich die je Arbeitsbereich entlang der Tunneltrasse angetroffenen Bodenarten aufgeführt (Spalten mit vertikal gesetzten Titeln).

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die einzelnen Arbeitsschritte aus Anhang A in der UVS in Gruppen zusammengefasst dargestellt. Tabelle 0-299 (Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.3., S. 844) gibt für jede dieser Gruppen die dazugehörige Freisetzungsrate sowie die insgesamt bewegten und freigesetzten Sedimentvolumina an. In Tabelle 4 in diesem Dokument sind zusätzlich die entsprechenden Sedimentmassen und Dichten sowie die eingesetzte Baggertechnik und die Verteilung der Sedimentfreisetzung in der Wassersäule angegeben.

**Tabelle 2: Ausschnitt des Bauablaufplans für den Absenktunnel, Herstellung der Umschließungsdämme der Landgewinnungsflächen (vgl. FEHY (2013b) Anhang A, die Tabelle setzt sich nach rechts (fortlaufende Zeit) und unten (weitere Arbeitsschritte) fort).**

WORK SECTIONS	Material		Equipment		Quantity [m <sup>3</sup> ]	Production [m <sup>3</sup> /week]	Time [weeks]	Spillage				Volumes [m <sup>3</sup> ]	Weight [kg]	Weight/Sec [kg/s]	PLANNING 24h/day!!! (Start wk 42 = 13-Oct-2014)													
	Type	Source	Type	Cap.				Av	Av	Point	In water column				Av	Av	Weight/Sec	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
	[-]	[-]	[-]	[m <sup>3</sup> ]				[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[-]	[-]				[m <sup>3</sup> ]	[kg]	[kg/s]											
<b>Containment dikes (DC)</b>																												
Lolland - East - Section 1 (1,250m)	Sand	Kriegers Flak	BHD1	4	100,247	23,000	4.36	15.00	0.80	D1	Entire Water Column	802	1,503,705	0.57														
	Clay Till	Work Harbour	BHD2	4	123,194	23,000	5.36	15.00	0.70	D1	Entire Water Column	862	1,847,910	0.57														
	Armour	Quarry	GD1,2,3	2	64,136	7,500	8.55	2.00	0.10	D1	Entire Water Column	64	128,272	0.02														
Lolland - East - Section 2 (2,350m)	Sand	Kriegers Flak	BHD2	4	146,739	23,000	6.38	15.00	0.80	D2	Entire Water Column	1,174	2,201,085	0.57														
	Clay Till	Work Harbour	BHD1	4	191,962	23,000	8.35	15.00	0.70	D2	Entire Water Column	1,344	2,879,430	0.57														
	Armour	Quarry	GD1,2,3,4,5	2	98,380	12,500	7.87	2.00	0.10	D2	Entire Water Column	98	196,760	0.04														
Lolland -West (1700m)	Sand	Kriegers Flak	BHD1	4	107,370	23,000	4.67	15.00	0.80	D3	Entire Water Column	859	1,610,550	0.57														
	Clay Till	Work Harbour	BHD2	4	140,460	23,000	6.11	15.00	0.70	D3	Entire Water Column	983	2,106,900	0.57														
	Armour	Quarry	GD1,2,3,4,5	2	71,985	12,500	5.76	2.00	0.10	D3	Entire Water Column	72	143,970	0.04														
Fehmarn - East (650m)	Sand	Kriegers Flak	BHD5	4	44,535	23,000	1.94	15.00	0.80	D4	Entire Water Column	356	668,025	0.57														
	Clay Till	P&R	BHD6	4	53,585	23,000	2.33	15.00	0.70	D4	Entire Water Column	375	803,775	0.57														
	Armour	Quarry	GD4,5,6	2	28,590	7,600	3.76	2.00	0.10	D4	Entire Water Column	29	57,180	0.03														

**Tabelle 3: Ausschnitt des Bauablaufplans für den Absenktunnel, Herstellung des Tunnelgrabens (vgl. FEHY (2013b) Anhang A, die Tabelle setzt sich nach rechts (fortlaufende Zeit) und unten (weitere Arbeitsschritte) fort).**

DREDGING - BREAKDOWN - SECTIONS				Quantity		Production		Time		PLANNING																						
Level	Equipment	Disposal		Quantity	Production	Time			Soils				Spillage				Location				Volumes				Weight				Weight/Sec			
[MSL-m]	[-]	[-]	[-]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /week]	[weeks]			Gytia	Lake Glacial Clay	Paleogene Clay	Clay till	Lake G. Sand/silt	Peat G. Sand	G. Melt water sand	dry density	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	Location	[m <sup>3</sup> ]	[kg]	[kg/s]	1	2	3	4	5	6	7	8		
<b>Section G1 (TE 1-10)</b>																																
All material	above -25	BHD2	15	Fehmarn	1,437,615	90,000	6.99	10%	0%	30%	40%	0%	20%	0%	100%	1594	3.50	55.8	Entire Water Column	28,303	45,115,054	8.3										
All material (excl. Clay-till)	below -25	BHD2	25	Fehmarn	628,957	70,000	6.99	10%	0%	30%	40%	0%	20%	0%	100%	1594	3.50	55.8	Entire Water Column	22,013	35,089,487	6.5										
Clay-till	below -25	GD1-5	10	-	198,915	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-										
		GD1-5	13,200	only - np	198,915	-	1.73									1990	-	-	DL to DL+5m	0	0	0.0										
		GD1-5	10	Lolland	198,915	115,000	1.73									1990	3.50	69.7	Entire Water Column	6,952	13,854,430	13.2										
<b>Section G2 (TE 11-20)</b>																																
All material	above -25	BHD2	15	Lolland	255,365	90,000	1.60	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	670	3.50	23.5	Entire Water Column	5,027	3,388,424	3.5										
		BHD2	25	Lolland	111,722	70,000	1.60	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	670	3.50	23.5	Entire Water Column	3,910	2,619,855	2.7										
All material (excl. Clay-till)	below -25	GD1-5	10	Lolland	1,078,747	115,000	9.38	25%	75%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	1165	3.50	40.8	Entire Water Column	37,756	43,985,009	7.8										
Clay-till	below -25	GD1-5	13,200	only - np	490,986	-	4.27									1990	-	-	DL to DL+5m	0	0	0.0										
		GD1-5	10	Lolland	490,986	115,000	4.27									1990	3.50	69.7	Entire Water Column	17,186	34,197,175	13.2										

**Tabelle 4: Zusammengefasste Arbeitsschritte, Sedimentfreisetzungsraten, Sedimentvolumen und –massen, Trockendichten sowie Baggertypen und Ort der Sedimentfreisetzung in der Wassersäule zur Prognose der Sedimentverdriftung beim Bau des Absenktunnels.**

Arbeitsschritt	Sediment-Freisetzung [%]	Bewegtes Sedimentvolumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	Freigesetztes Sedimentvolumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	Trockendichte [t/m <sup>3</sup> ]	Freigesetzte Sedimentmasse [Mio. t]	Baggertechnik	Ort der Freisetzung in der Wassersäule
Baggerarbeiten für Tunnelgraben und Fahrrinne	3,5	15,50	0,540	0,67-1,99	0,921	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Umschließungsdeiche	0,1–0,8	1,20	0,007	1,59-1,99	0,013	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Portal und Rampen Lolland	0,1-0,7	0,36	0,002	1,33-1,99	0,004	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Portal und Rampen Fehmarn	0,1-0,7	0,32	0,002	1,33-1,99	0,004	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Arbeitshafen Lolland	0,1–0,8	2,87	0,020	1,49-1,99	0,031	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Arbeitshafen Fehmarn	0,1–0,8	0,10	0,001	1,59-1,99	0,001	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Landgewinnung	0,5	20,80	0,104	1,49	0,156	Schaufelbagger und Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Rückverfüllung Graben Lolland	0,1–0,8	3,40	0,015	1,59-1,99	0,028	Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Rückverfüllung Graben Fehmarn	0,1–0,8	3,00	0,013	1,59-1,99	0,025	Greifbagger	Gleichmäßig verteilt
Landschaftsbau Landgewinnungsfeld	0,5-2,0	4,31	0,039	1,49-1,59	0,045	Laderaumsaugbagger und Muldenkipper	Gleichmäßig verteilt
<b>Gesamtmenge bewegt/freigesetzt</b>		<b>51,86</b>	<b>0,743</b>		<b>1,228</b>		

Sofern einer der zusammengefassten Arbeitsschritte unterschiedliche Freisetzungsraten enthält (z. B. durch unterschiedliche Baggertechnik), ist in der Tabelle eine Wertespanne aller erwarteten Freisetzungsraten angegeben.

Zur Berechnung der Sedimentverdriftung im Modell werden die in den Detailplänen vorgegebenen Sedimentvolumina in Massen umgerechnet.

Die Umrechnung gliedert sich für jeden Arbeitsschritt wie folgt:

- Das bewegte Bodenvolumen, die Freisetzungsraten und die Verteilung der Freisetzung in der Wassersäule werden dem detaillierten Bauablaufplan (Anlage A, FEHY 2013b) entnommen. Daraus ergeben sich das bei einem Arbeitsschritt freigesetzte Sedimentvolumen und dessen anfängliche Verteilung.
- Dem freigesetzten Sedimentvolumen werden Bodenarten zugeordnet. Die Zuordnung basiert auf dem geologischen Untergrundmodell und ist spezifisch für jeden Arbeitsbereich.
- Das freigesetzte Sedimentvolumen je Bodenart wird in Massen umgerechnet. Dazu werden die bodenspezifischen Dichten aus dem geologischen Modell verwendet.
- Die freigesetzte Masse je Bodenart wird auf die fünf Modellfraktionen aufgeteilt. Jede Bodenart wird im Modell durch eine Kombination von fünf Modellfraktionen repräsentiert.
- Das Ergebnis dieser Rechenschritte sind die freigesetzten Massen je Modellfraktion für jeden Arbeitsschritt im Bauablauf. Diese Massen sind die Eingangsgrößen für die Sedimentverdriftung. Wobei die Sandfraktion, wie in Kap. 2.3 ausgeführt, nicht Bestandteil dieser Modellierung ist.

Zur Umrechnung der Sedimentvolumina wird basierend auf dem geologischen Modell entlang der Tunneltrasse je Arbeitsort die Bodenzusammensetzung ermittelt. Das geologische Modell fußt auf Erkundungsdaten und enthält u. a. Korngrößenverteilungen der einzelnen Bodenproben (Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.1., S. 810ff.). Aus der Kenntnis der angetroffenen Bodenarten, der Dichte der jeweiligen Bodenarten sowie der freigesetzten Volumina können die Massen der freigesetzten Sedimente je Bodenart berechnet werden.

Das Sedimentverdriftungsmodell betrachtet anstatt einzelner Bodenarten eine Anzahl charakteristischer Sedimentfraktionen. Jede Bodenart lässt sich durch die Kombination einzelner Fraktionen beschreiben. Für die Verdriftungsmodellierung wurden fünf Fraktionen definiert (Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.1., S. 810ff.), wobei die vier feineren kohäsiven Fraktionen Teil der Verdriftungsmodellierung sind. Die größte Fraktion (Sand) setzt sich aufgrund ihrer hohen Sinkgeschwindigkeit im direkten Bauwerksumfeld ab und wird Teil des Geschiebetransports.

Die Freisetzung der einzelnen Fraktionen wird als gleichmäßig über die Wassersäule verteilt angenommen (siehe Tabelle 4).

Für die Ergebnisdarstellung der Verdriftungsmodellierung werden alle Modellfraktionen zusammen dargestellt (z. B. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Anhang B Methodik, Kapitel 0.3.4.1.4.3., Abbildung 0-273, S. 867 f.). Das Ergebnis der Sedimentverdriftungsmodellierung ist also die räumliche und zeitliche Verteilung der Schwebstofffrachten sowie die flächenhafte und zeitliche Verteilung der Sedimentation aller projektbedingt freigesetzten Sedimente während der gesamten Bauzeit.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Sedimentverdriftungsmodellierung wurde die zeitlich und räumlich zonierte Aufstellung der maximal erlaubten Sedimentfreisetzungsraten erstellt (Anlage 12 der Planänderungsunterlagen, Anhang IA, Maßnahmenblatt 8.2M, Tabelle 8.2-1, S. 93). Der LBP führt zum Ziel dieser Vorgabe aus (Maßnahmenblatt 8.2M, S. 90 ff.):

*„Mittels der vorgegebenen Sedimentfreisetzungsraten und baggerfreien Perioden nach Zonen und Jahreszeiten, Jahren und auf die gesamte Bauzeit bezogen wird sichergestellt, dass [...] die in der Auswirkungsprognose prognostizierte Schwere der projektbedingten Beeinträchtigungen der Meeresumwelt nicht überschritten wird.“*

## 4.5 Punkt 18: Berücksichtigung von Sedimenten im offenen Graben

### Sachverhaltsermittlung Juli 2014:

„Es ist nicht nachvollziehbar, ob die mit ca. 1 Mio m<sup>3</sup> angesetzte, im offenen Graben sedimentierende Schwebstoffmenge bei den Baggermengen und der Schwebstofffreisetzung berücksichtigt worden ist (s. Anlage 15, Anhang B, S. 844ff). Dies muss dargelegt und ggfls. nachgeholt werden (da es sich um Material mit einem höheren Feinkornanteil handeln könnte, ist dies für die Schwebstofffreisetzung und damit die vorhabenbedingten Wirkungen besonders relevant).“

### Stellungnahme Dezember 2015:

„Die Erwiderung ist plausibel und soll entsprechend Punkt 1 Bestandteil der detaillierte Vorhabenbeschreibung der Vorzugsvariante und der schutzgutspezifischen Auswirkungsprognosen (Schiffs-/Baggerlärm, Sedimentfreisetzung, Auswirkungen auf Wasserqualität etc.) sein.“

### Antwort:

Eine Beschreibung der Grabenreinigung mittels Laderaumsaugbagger wurde in Anlage 27.1, Kap. 3.1.2. (S. 23, Bodenbilanz Nassbaggerarbeiten) ergänzt. Der Laderaumsaugbagger pumpt das Wasser-Sedimentgemisch vom Boden des Grabens, ohne sedimenterzeugende Wasserabtrennung, in seinen Laderaum. Sobald der Laderaum gefüllt ist, wird das Wasser-Sedimentgemisch auf die Landgewinnungsfläche auf Lolland verbracht. Das Wassersedimentgemisch wird in den östlichen Landgewinnungsflächen auf Lolland eingebracht. Dort werden sich die im Wasser befindlichen Sedimente absetzen. Das verbleibende Wasser wird über einen kontrollierten Überlauf in den Fehmarnbelt zurückgeführt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich in dem zurückgeführten Wasser noch geringe Mengen besonders feinen Sediments befinden. Diese sehr geringe Sedimentfreisetzung ist über die zulässigen Sedimentfreisetzungsmengen abgedeckt.

In den naturschutzfachlichen Planänderungsunterlagen wird der Arbeitsschritt Grabenreinigung in der Beschreibung des Vorhabens bzw. des Bauablaufs dargestellt:

- Anlage 12, Kap. 3.4. (S. 123, Beschreibung Bauverfahren)
- Anlage 19, Teil A, Kap. 6.1.4. (S. 48, Beschreibung Bauverfahren)
- Anlage 20, Kap. 3.1.3.2. (S. 137, Erhaltungsbaggerungen am offenen Tunnelgraben)
- Anlage 21, Kap. 3.2.4. (S. 47, Beschreibung Bauverfahren)

Während der Reinigung des Tunnelgrabens wird es nicht zu einer zusätzlichen Freisetzung von Sedimenten kommen. Auswirkungen auf die Wasserqualität sind entsprechend nicht zu erwarten. Eine naturschutzfachliche Bewertung ist daher nicht erforderlich. Die mögliche Sedimentfreisetzung in Folge der Einleitung des überschüssigen Wassers aus der Landgewinnungsfläche ist im Modell bereits enthalten und somit Grundlage der Auswirkungsprognose.

Der durch den Laderaumsaugbagger verursachte Unterwasserschall wird bei der Schallmodellierung berücksichtigt. Die Reinigung des Tunnelgrabens erfolgt immer lokal begrenzt und direkt vor dem Einbringen der Bettungsschicht, also zeitlich und räumlich direkt mit dem Absenkvorgang verknüpft. Die auf der Modellierung basierende Schallausbreitungsprognose (vgl. Anlage 22.5. der Planänderungsunterlagen, Anhang 1 und 2) dient als Grundlage der Auswirkungsprognose in den naturschutzfachlichen Unterlagen:

- Anlage 12 (Kap. 7.3.4.)
- Anlage 19, Teil B II (Kap. 4.4.2.1., 5.4.2.1., 7.4.2.1.), Teil B III (Kap. 4.3.1.1.), Teil B VIII (Kap. 6.3.1.1.)
- Anlage 20 (Kap. 3.2.1.11., 4.1.6., 6.6.2.3.5., 6.6.3.3.1., 6.6.6.)
- Anlage 21 (Kap. 5.1.2.1.2)

#### **4.6 Punkt 19: Herleitung der Wirkschwellen bei benthischer Flora (einschließlich der Gleichverteilung von Sedimentationsereignissen über das Jahr)**

##### **Sachverhaltsermittlung Juli 2014:**

„Es ist zu erläutern, wie, obwohl, wie die Autoren selbst konstatieren, die Auswirkungen von erhöhten Sedimentationsraten und -dauern auf die benthische Flora kaum untersucht sind, detaillierte Differenzierungen zu Wirkschwellen abgeleitet worden sind und wie dabei das Vorsorgeprinzip bei unsicherem Wissen angewendet worden ist. Das gilt auch für die Annahme einer Gleichverteilung von Sedimentationsereignissen über das Jahr (N=36) und wieso dies als „konservativer Ansatz“ gewertet werden kann. Dies ist auch zur Bewertung der Auswirkungen unter FFH-Gesichtspunkten relevant(\*6).“

Fußnote: “ (\*6) Ordner 13, Anlage 15, Band 3, Kap. 5.2.6 enthält Ableitungen (Quantifizierungen) zu den potenziellen Projektwirkungen Flächeninanspruchnahme, Schwebstoffe, Sedimentation auf die benthische Flora. Die potenziellen Auswirkungen bestimmter Erhöhungen der Schwebstoff-Konzentration werden im mathematischen Modell abgebildet (nicht prüfbar). Die Auswirkungen erhöhter Sedimentationsraten werden verbal-argumentativ beschrieben und hinsichtlich der Wirkintensität kategorisiert. Dabei fällt auf, dass die Autoren zum einen selbst konstatieren, dass die Auswirkungen von erhöhten Sedimentationsraten und -dauern auf die benthische Flora kaum untersucht sind, zum anderen dann aber detaillierte Differenzierungen zu Wirkschwellen vornehmen. Dabei wird auch die mögliche Resuspension des baubedingt freigesetzten Sediments als die Beeinträchtigungen mindernd berücksichtigt und eine Gleichverteilung dieser Ereignisse über das Jahr (N=36) als „konservativer Ansatz“ benannt. Diese Ereignisse treten jedoch, wie die Autoren auf S. 1926 selbst konstatieren, v.a. in Herbst und Winter auf. Es erscheint deshalb nicht plausibel, auch für den Sommer eine mittlere Bedeckungszeit der Algen von „nur“ 10 Tagen (bis zum nächsten Resuspensionsereignis) anzusetzen. Dieser Schritt definiert die Empfindlichkeit und stellt eine wesentliche Grundlage für die spätere Prognose auf Auswirkungen dar. Insgesamt ist es möglich, dass die Beeinträchtigungen hier unterschätzt werden. Dies ist zu überprüfen und ggfls. anzupassen.“

##### **Stellungnahme Dezember 2015:**

„Die Erwiderung gibt zusätzliche Informationen bzw. fasst vorliegende Informationen zusammen, die vollumfänglich in die Planänderungsunterlagen einzubeziehen sind.“

##### **Antwort**

###### **Wirkschwelle für Schwebstoffe**

Schwebstoffe können zu Lichttrübung im Wasser führen und die Fotosyntheserate verringern. Sie sind daher der maßgebliche Faktor beim Aufbau von Biomasse in der benthischen Flora. Es gilt der Grundsatz: Je mehr Schwebstoffe in der Wassersäule vorhanden sind, desto höher ist die Lichttrübung und desto eher wird der Biomasseaufbau beeinflusst. Die Grundlage für

die Festlegung der Wirkschwelle der Schwebstoffe ist daher die natürliche Biomassevariabilität zwischen einzelnen Jahren (als Abweichung von einem langjährigen Mittelwert; vgl. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band III, Kapitel 5.2.6.2, S. 1923 ff.). Diese Biomassevariabilität wurde anhand von Daten mit Biomasse-Zeitreihen aus dem Fehmarnbelt und dem Øresund bestimmt.

Die einzelnen Arten und damit auch Pflanzengemeinschaften unterscheiden sich hinsichtlich ihrer natürlichen Biomassevariabilität stark voneinander. Die Zeitreihen ergaben je nach Vegetationsform (Makroalgen bzw. Seegras) eine natürliche Biomassevariabilität von durchschnittlich 10 bis 25 % (Maximum 36 %) zwischen einzelnen, klimatisch unterschiedlichen Jahren. Solche Biomasseschwankungen sind also der Regelfall und das Ökosystem ist auf diese Schwankungen angepasst. Es kann seine Ökosystemfunktionen unter solchen Verhältnissen uneingeschränkt erfüllen. Erst wenn die Biomasseschwankungen größer ausfallen, kann davon ausgegangen werden, dass Veränderungen von Ökosystemfunktionen eintreten können.

Die Kenntnisse über die Biomasseschwankungen beschränken sich auf Seegras und die Gesamtbiomasse von Algengemeinschaften generell. Es ist nicht für jede vorkommende Art oder Pflanzengemeinschaft bekannt, wie stark die Biomasse in Abhängigkeit der geografischen Lage, Wassertiefe und klimatischen Verhältnisse natürlicherweise schwanken kann. Es wurde daher vorsorglich der untere gefundene Wert von 10 % für alle Pflanzengemeinschaften als Wirkschwelle für Schwebstoffe übernommen. Die Auswirkungsprognose der UVS nimmt dann eine mögliche Beeinträchtigung der Pflanzen an, wenn das Vorhaben eine Veränderung der Biomasse um 10% oder mehr bewirken kann.

Das bedeutet, dass für die überwiegende Zahl der Arten und Gemeinschaften projektbedingte Biomasseschwankungen bereits als Auswirkungen gewertet werden, obwohl diese noch im Bereich der natürlichen Schwankungsbreite liegen. Damit wird sichergestellt, dass es nicht zu einer Unterschätzung der Auswirkungen kommen kann. Der Grenzwert zwischen geringer und mittlerer Beeinträchtigung in der UVS liegt bei 25 % Biomassereduktion und damit innerhalb der über Zeitreihen bestimmten mittleren natürlichen Biomassevariabilität.

### **Wirkschwelle für Sedimentation**

Die Wirkintensität für die Sedimentation hängt von der Höhe der abgelagerten Sedimentschicht und von der Verweildauer des Sediments am Meeresboden ab. Im Folgenden wird dargestellt, wie die Schwellenwerte einer Wirkintensität für diese beiden Komponenten abgeleitet wurden.

### **Verweildauer**

Natürliche Hintergrundwerte für die Sedimentverweildauer lassen sich aus Modellkalkulationen des betroffenen Meeresgebietes ableiten. Die Verweildauer beschreibt die Zeit zwischen zwei Resuspensionsereignissen.

Resuspension von Sediment wird verursacht durch starke Winde in Verbindung mit daraus resultierenden Wellen und einer Strömung am Meeresboden, die stark genug ist, das Sediment aufzuwirbeln. Sie kann für die Festlegung der Wirkschwelle genutzt werden. Die natürliche Dynamik von Meeressedimenten ist im Forschungsprojekt DYNAS (Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation) untersucht worden. Die DYNAS-Modellkalkulationen aus dem Bereich des Fehmarnbells (Harff 2005, Harff et al. 2006) zeigen, dass Resuspension und Geschiebetransport bis in Tiefen von 15-20 m vorkommen. Es wird demzufolge davon ausgegangen, dass die Resuspension den gesamten Bereich umfasst, in dem Pflanzenbewuchs vorkommt. Die Häufigkeit solcher Ereignisse im Gebiet ist dabei für kleine Korngrößen (z. B. Tonfraktion) und/oder für das Flachwasser höher. Die meisten Ereignisse werden in den Herbst- und Wintermonaten beobachtet, wenn die Schubspannung durch Wind und Strömung hoch genug ist, um Resuspension zu ermöglichen. Im Sommer (also zum Hauptwachstumszeitraum der Pflanzen) ist die Verweildauer der abgelagerten Sedimente länger.

Die DYNAS-Modellkalkulationen ergaben für den Fehmarnbelt Resuspensionsereignisse an 10 % eines Jahres gerechnet. Im Sommer sind Resuspensionsereignisse seltener als dieser Wert (die Verweildauer daher länger), im Winter häufiger (geringere Verweildauer). Bezogen auf die Hauptvegetations- und Reproduktionszeit im Frühjahr und Sommer stellt der Wert von 10 % einen konservativen Wert dar. In diesem Zeitraum sind Resuspensionsereignisse weniger häufig als 10 % und damit die Verweildauer von Sedimenten typischerweise länger. Die Pflanzen sind also im Frühjahr- und Sommerzeitraum (als der Zeit der höchsten Empfindlichkeit) an längere Verweildauern von Sedimentation angepasst. Dennoch wird für die Auswirkungsprognose bereits eine kürzere Verweildauer als Wirkschwelle verwendet. Dies kann zu einer Überschätzung der Auswirkungen auf Reproduktion und Biomassereduktion führen. Im Herbst und Winter ruhen viele Algen (wenig oder kein Wachstum, Überdauerung als Sporen) und sind daher weniger empfindlich gegenüber Sedimentation. Sie können daher grundsätzlich längere Phasen mit Sedimentation vertragen, unabhängig davon, dass gleichzeitig vermehrt Resuspensionsereignisse auftreten.

Für die Wirkschwelle muss der Wert von 10 % Resuspensionshäufigkeit in eine Verweildauer umgerechnet werden. Es ist nicht bekannt, wann diese Ereignisse innerhalb eines Jahres auftreten. Damit ist auch unklar, wie lange die jeweiligen Sedimentationsschichten typischerweise liegen bleiben (Verweildauer). Für die Wirkschwelle muss daher eine untere Grenze der Verweildauer gefunden werden, um die Auswirkungen nicht zu unterschätzen. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die Ereignisse nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern gehäuft zu den Zeiten stattfinden, in denen natürlicherweise z.B. Starkwindereignisse vorherrschen. Die angenommene Gleichverteilung führt nun dazu, dass rechnerisch vergleichsweise kurze Verweildauern entstehen, die sich als untere Grenze eignen. 10% der Tage eines Jahres sind 36,5 Tage ( $365/10$ ). 36,5 Tage mit einem Resuspensionsereignis gleichmäßig auf ein Jahr verteilt ergibt ein Ereignis alle 10 Tage ( $365/36,5$ ). Das bedeutet, dass eine gegebene Sedimentschicht 10 Tage liegen bleibt (bzw. sich über 10 Tage aufbauen kann) bevor sie wieder resuspendiert wird. Sobald nicht von einer gleichmäßigen, sondern von der natürlichen, unregelmäßigen Verteilung ausgegangen wird, entstehen an einer Stelle im Jahr längere Verweildauern als 10 Tage (Häufung zu einer Zeit bedingt Streckung zu anderen

Zeiten, wenn die Anzahl der Ereignisse gleich bleibt). Daraus folgt, dass auch längere Verweildauern von Sediment natürlich sind und die Pflanzen daran angepasst sein müssen. Daher sind die 10 Tage Verweildauer als Wirkschwelle konservativ. Diese Zahl gibt also eine untere Grenze dafür an, wie lange Sedimentationsereignisse unter natürlichen Bedingungen im Fehmarnbelt andauern und damit, an welche Verhältnisse die Pflanzen angepasst sind.

## **Dicke der Sedimentschicht**

Für Seegras gibt es eine wissenschaftliche Untersuchung über den quantitativen Zusammenhang von Sedimentationshöhe und Sterblichkeitsraten sowie Produktivität (Mills & Fonseca 2003). Es gibt ansonsten lediglich qualitative Aussagen aus der Literatur über Makroalgen (vgl. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band III, Kapitel 5.2.6.3., S. 1927). Daher wurde die Wirkschwelle anhand der spezifischen Merkmale der Pflanzengemeinschaften festgelegt (vgl. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band III, Kapitel 5.3.6.2.2., S. 2101 ff.). Dies bedingt zunächst eine Unterscheidung von Hart- und Weichbodengemeinschaften. Die Algengemeinschaften sind Hartbodengemeinschaften (Ansiedlung auf Harts substrat wie z.B. Steinen). Die höheren Pflanzen (Seegras, Teichfaden) siedeln auf Weichböden (wurzeln Pflanzen). Die folgenden Merkmale der Pflanzen haben Einfluss auf die Empfindlichkeit gegenüber Sedimentation und bedingen daher unterschiedliche Wirkschwellen: Wuchshöhe der Pflanzen, Zeiten der Reproduktion, Art der Reproduktion. Die Reproduktionsstadien spielen insofern eine wichtige Rolle, als diese aufgrund ihrer geringen Größe empfindlicher gegenüber Sedimentation sind als juvenile oder ausgewachsene Pflanzen, denn sie können schon von dünnen Schichten vollständig überdeckt werden oder potenziell daran gehindert werden, sich an Harts substrat festzusetzen. Der verwendete konservative Ansatz berücksichtigt daher maßgeblich diese Reproduktionsstadien.

## **Hartbodengemeinschaften – Makroalgen**

Die Wirkschwelle für die Sedimentationshöhe bei einer Verweildauer von als 10 Tagen oder mehr ist für die Makroalgen auf 2 mm festgelegt worden. Dies ist ein konservativer Wert, der sich aus den folgenden Überlegungen ergibt.

### **Wuchshöhe**

Die kleinsten Arten sind naturgemäß die empfindlichsten Arten, da diese bereits von dünnen Schichten Sediment vollständig überdeckt werden können. Die Wuchshöhe ausgewachsener Makroalgen liegt im Bereich weniger Zentimeter bis über 40 cm. Juvenile Pflanzen sind im Anfangsstadium noch kleiner. Eine Sedimentation am Meeresboden kann also auch von den kleinsten Arten ohne Auswirkungen vertragen werden, solange die Phylloide (= "Blätter" der Algen) noch über der Sedimentschicht bleiben. Daraus ergibt sich, dass Sedimentschichten am Meeresboden bereits ab einer Höhe von wenigen Millimetern bei juvenilen Algen zu Auswirkungen führen, wenn diese über eine längere Zeit bestehen bleiben. Das Sediment kann sich ebenfalls auf den Phylloiden der Algen absetzen, die breite Phylloidflächen besitzen und einen eher waagerechten Wuchs aufweisen. Solche Algen bieten dem Sediment eine große

Absetzfläche. Das Sediment kann dann die Fotosynthese behindern. In der Regel sorgt jedoch die Bewegung der Blätter mit der vorhandenen Wasserströmung oder Wellenbewegung dafür, dass solche Sedimente schnell wieder von den Phylloiden abgeschwemmt werden. Bei feinen Sedimenten können dennoch wenige Millimeter bereits zu Auswirkungen führen.

## Reproduktion

Die meisten Algen pflanzen sich über Reproduktionsstadien fort, die wesentlich kleiner sind als die späteren Algen. Die Fortpflanzung selbst erfolgt typischerweise in Form von Sporen oder Gameten (mobile Fortpflanzungsstadien) im Wasser treiben und sich andernorts absetzen oder miteinander verschmelzen. Vegetative Fortpflanzung ist dagegen selten. Für die Empfindlichkeit gegenüber Sedimentation bedeutet dies, dass die Ansiedlung von Sporen und die sich daraus bildenden Pflanzen die empfindlichsten Stadien der Arten sind. Das bedeutet, dass in Hinsicht auf die Sedimentationshöhe bereits wenige Millimeter Sediment Auswirkungen auf die Ansiedlung der Algen haben kann. Aus Erfahrungswerten von Sedimentationshöhen im Flachwasser (bis zu 50 mm) und tieferen Meeresbereichen (1–2 mm) wurde daher der Wert von 2 mm als konservativer Schwellenwert übernommen (vgl. Anlage 15 der Planfeststellungsunterlagen, Band III, Kapitel 5.3.6.2.2., S. 2101f.). Da der Schwellenwert im unteren Bereich der natürlichen Sedimentationshöhen liegt, ist eine Unterschätzung der Auswirkungen ausgeschlossen.

## Weichbodengemeinschaften – Höhere Pflanzen

Die Wirkschwelle für die Sedimentationshöhe bei einer Verweildauer von als 10 Tagen oder mehr ist für die Makroalgen auf 1 cm festgelegt worden. Dies ist ein konservativer Wert, was sich aus den folgenden Überlegungen ergibt.

### Wuchshöhe

Grundsätzlich können höhere Pflanzen Ressourcen speichern und sind so fähig, auch mehr als 10 Tage mit reduzierter Fotosynthese zu überstehen, wenn sie den Wirkungen von Sedimentation ausgesetzt sind. Die im Gebiet vorkommenden höheren Pflanzen haben zudem eine große fotosynthetisch aktive Fläche.

Die Charakterart Seegras (*Zostera marina*) wächst aufrecht und erreicht mittlere Wuchshöhen von ca. 50 cm in der westlichen Ostsee (Jegzentis 2005). Die Wuchsform bietet wenig Angriffsfläche für Sedimentation, da das Seegras kaum verzweigt ist und die Sprosse schmal und bandförmig sind. Die Seegrasblätter sind zwar dünn und scheinbar zerbrechlich, allerdings sorgt die eingelagerte Zellulose für ein gewisses Maß an Stabilität. Vor allem in geschützten Buchten können Seegräser stark von epiphytischen, feinen und verzweigten Algen bewachsen sein. Dadurch wird die Angriffsfläche für Sedimente deutlich erhöht und Seegräser können leichter zu Boden gedrückt werden.

Meersalden und Teichfaden haben geringere Wuchshöhen. Sie werden etwa 15–20 cm hoch. Die Oberfläche der Pflanzen ist gering, da es sich um gering verzweigte Arten mit sehr schmalen Blättern handelt. Sie sind gegenüber der Sedimentation eher empfindlich, wenn sie von epiphytischen, feinfädigen Algen überwachsen sind. Die Struktur der Blätter ist fein und dünn, wird jedoch durch die Einlagerung von Zellulose etwas stabilisiert.

Durch die wurzelnde und aufrechte Form der Pflanzen in Verbindung mit schmalen Blättern, können erst Sedimentationshöhen am Meeresboden in der Größenordnung von mehreren Zentimetern zu Auswirkungen führen. Dazu kommt, dass solche Pflanzenbestände auch natürliche Sedimentfallen bilden und das Einfangen und Binden von Sedimenten ein Charakteristikum dieser Pflanzengemeinschaften ist. Sie sind daher insgesamt an einen gewissen Grad von Sedimentation angepasst. Sedimentation auf den Blättern selbst ist aufgrund der Wuchsform kein für die Auswirkungen maßgeblicher Faktor, zumal die höheren Pflanzen in den flachen Bereichen verbreitet sind, in denen es fast immer Wellenbewegung vorherrscht und das Wasser entsprechend in Bewegung ist. Das Sediment wird daher schnell von den im Wasser hoch stehenden Pflanzen abgeführt.

Aus alledem ergibt sich, dass Auswirkungen die auf die Sedimentation zurückzuführen sind, erst bei mehreren Zentimetern Höhe anzunehmen sind. Die angenommene Wirkschwelle für Makroalgen mit 1 cm liegt darunter und stellt sicher, dass sämtliche vorhabenbedingten Auswirkungen bewertet werden.

#### Reproduktion

Höhere Pflanzen und insbesondere das Seegras verbreiten sich vorwiegend durch vegetative Vermehrung (Ausläufer). Die Reproduktion wird daher durch Sedimentation nicht gestört. Die Samen der Pflanzen sind auf Sediment angewiesen, um darin keimen und Wurzeln bilden zu können. Auswirkungen durch Sedimentation sind daher bei diesen Fortpflanzungsstadien erst dann zu erwarten, wenn sich dicke Sedimentschichten in der Größenordnung einiger Zentimeter anlagern.

## 5. Quellenverzeichnis

Bundesanstalt für Wasserbau. (Januar 2011). *Machbarkeitsstudie zum Ausbau des Seekanals Rostock auf eine Tiefe von 16,60 m unter NHN – Hydrodynamik*. BAW A 395 503 10184. Hamburg: BAW.

Corelab - Gruppe Küstenmodellierung. (2008). *Vergleich hydrodynamischer Modelle der Ostsee (MUSTOK)*. Abgerufen am 31. Oktober 2017 von FTZ Uni Kiel: <https://www.ftz.uni-kiel.de/de/forschungsabteilungen/corelab-kuestenmodellierung/abgeschlossene-projekte/hydrodynamische-modelle>

Corelab - Gruppe Küstenmodellierung. (2013). *Morphodynamik in der Kieler Förde*. Abgerufen am 31. Oktober 2017 von FTZ Uni Kiel: <https://www.ftz.uni-kiel.de/de/forschungsabteilungen/corelab-kuestenmodellierung/abgeschlossene-projekte/morphodynamik>

DWA. (2015a). DWA-Regelwerk, Merkblatt DWA-M 543 (1-3), Geodaten in der Fließgewässermodellierung. *Dezember 2015*. Hennef: DWA.

DWA. (2015b). DWA-Regelwerk, Merkblatt DWA-M 543-3, Geodaten in der Fließgewässermodellierung, Teil 3: Aspekte der Strömungsmodellierung und Fallbeispiele. *Dezember 2015*. Hennef: DWA.

DWA. (2016). DWA Regelwerk, Merkblatt DWA-M 544-2, Ausbreitungsprobleme von Einleitungen – Prozesse, Methoden und Modelle – Teil 2: Mehrdimensionale Modelle. *Juli 2016*. Hennef: DWA.

FEHY. (2013a). *Fehmarnbelt Fixed Link, Marine Water: Hydrography of the Fehmarnbelt Area - Impact Assessment*. Doc No E1TR0058, Volume II. Abgerufen am 10. November 2017 von <http://vmdokumentation.femern.dk/4.%20E1TR0058%20Vol%20IIfa23.pdf?filename=files/BR/4.%20E1TR0058%20Vol%20II.pdf>

FEHY. (2013b). *Fehmarnbelt Fixed Link EIA. Marine Soil - Impact Assessment. Sediment Spill during Construction of the Fehmarnbelt Fixed Link*. Doc No E1TR0059, Volume II. Abgerufen am 10. November 2017 von <http://vmdokumentation.femern.dk/8.%20E1TR0059%20Vol%20II6fdc.pdf?filename=files/BR/8.%20E1TR0059%20Vol%20II.pdf>

FEHY. (2013c). *Fehmarnbelt Fixed Link. Marine Water Baseline. Hydrography of the Fehmarnbelt Area*. Doc No E1TR0057, Volume II. Abgerufen am 09. November 2017 von <http://vmdokumentation.femern.dk/3.%20E1TR0057%20Vol%20IIc42d.pdf?filename=files/BR/3.%20E1TR0057%20Vol%20II.pdf>

- Gruß, G. (2004). *Untersuchungen der Veränderung der Bathymetrie einer experimentellen Verklappungsstelle mittels Fächerecholotmessungen (Diplomarbeit)*. Geesthacht: GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH.
- Harff, J. (2005). *DYNAS Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation. Vorhaben: Sedimentationsprozesse in der Mecklenburger Bucht Phase II – Abschlussbericht (Meilenstein 10)*. Forschungsvorhaben des BMBF (FKZ 03F0280A), Rostock-Warnemünde.
- Harff, J., Bobertz, B., Forster, S., & Seifert, T. (2006). *DYNAS Dynamik natürlicher und anthropogener Sedimentation. Ergebnisse zur Baggergutverbringung im Küstenbereich (Ostsee)*. Abschlussbericht des Projektes im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock und Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund.
- Jegzentsis, K. (2005). *Vegetationsstruktur von Seegrasbeständen (Zostera marina L.) entlang der deutschen Ostseeküste (Diploma Thesis)*. Greifswald: Ernst-Moritz-Arndt-University.
- Lumborg, U. (2005). Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. *Journal of Marine Systems*, 56(1-2), 179-193.
- Mike Powered by DHI. (kein Datum). *MIKE Product Dokumentation*. (DHI) Abgerufen am 31. 10 2017 von Mike Powered by DHI:  
<https://www.mikepoweredbydhi.com/download/product-documentation>
- Mills, K. E., & Fonseca, M. S. (2003). Mortality and productivity of eelgrass *Zostera marina* under conditions of experimental burial with two sediment types. *Marine Ecology Progress Series*, 255, 127-134.

### 6. Anhang

**Tabelle 5: Modelle zur Analyse der direkten und indirekten Projektwirkungen im marinen Bereich und deren Auswirkungen auf die entsprechenden Schutzgüter.**

Für einige Aspekte (Problemstellungen), bei denen Modelle verwendet werden könnten wurde dies nicht getan, weil die Auswirkungen unwesentlich sind. Über die Problemstellungen der Hydrographie und Sedimentverdriftung hinaus, sind die Resultate der Modellierungen auch als Grundlage für andere Fragestellungen im Rahmen von fachgutachterlichen Beurteilungen herangezogen worden.

Betrachtete Schutzgüter	Modellierte Aspekte	Angewendete Modelle/Modellplattformen
Quantifizierung der Belastungen (Wirkintensität) <b>Sedimentfreisetzung</b>	Verdriftung und Sedimentation der Sedimentpartikel, die während der Nassbagger und Einbauarbeiten freigesetzt werden	MIKE 3 MT (Sedimentationsmodell) MIKE 3 FM HD (Hydrographiemodell) und MIKE 21 SW (Wellenmodell) dynamisch, 3D (Wellen 2D)
<b>Hydrographie, Wasserqualität, Plankton</b> Ostsee Basis-/Bestands-/Ausgangssituation Auswirkungen des Baus	Bestehende hydrographische Bedingungen und Bedingungen der Wasserqualität und des Planktons in der Ostsee  Wirkungen der Tunnel- und Brückenbauten auf die hydrographischen Bedingungen in der gesamten Ostsee und die daraus folgendne Auswirkungen auf die Wasserqualität und das Plankton	Zwei regionale Modelle: MIKE 3 FM HD + ECO Lab) und MOM/ERGOM (IOW) Dynamisch, 3D Open Foam (3D CFD Modell zur Beschreibung der Umwelt nahe der Brückenpfeiler
Fehmarnbelt Basis/Bestands/Ausgangssituation Auswirkungen des Baus	Bestehende hydrographische Bedingungen und Bedingungen der Wasserqualität und des Planktons in der Ostsee  Wirkungen der Tunnel- und Brückenbauten auf die hydrographischen Bedingungen in der gesamten Ostsee und die daraus folgendne Auswirkungen auf die Wasserqualität und das Plankton	Zwei lokale Modelle: MIKE 3 FM HD + ECO Lab und GETM/ERGOM Dynamisch, 3D Open Foam (3D) zur Beschreibung der Umwelt nahe der Brückenpfeiler
<b>Wasserqualität, Plankton</b> Auswirkung der Sedimentverdriftungen	Auswirkungen durch suspendiertes Sediment aus (projektbedingten) Sedimentverdriftungen auf die Wasserqualität und Plankton	MIKE ECO Lab (Wassersäule) MIKE 3 FM HD und MIKE 3 MT Dynamisch, 3D
<b>Meeresbodenmorphologie</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation Auswirkungen des Baus/Hydrographie, Auswirkungen durch Sedimentverdriftung	Bestehender Sedimenttransport und Dynamik von Sohlformen und deren Einfluss auf die Strömung durch den Fehmarnbelt  Auswirkungen durch Veränderungen der hydrographischen Bedingungen (als Folge des Baus) auf Sohlformen (z. B. Sandwellen), nur Brücke Auswirkung der Sedimentation der Sedimentverdriftung auf die Sohlformen	MIKE 3 ST MIKE 3 FM HD und MIKE 21 SW Dynamisch, 3D (Wellen 2D) DUNE (2D) oder Open Foam (3D) zur Beschreibung der Bedingungen nahe des Meeresbodens

Betrachtete Schutzgüter	Modellierte Aspekte	Angewendete Modelle/Modellplattformen
<b>Küstenmorphologie</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation Auswirkungen des Baus	Bestehende Dynamik entlang der Küstenlinien von Lolland und Fehmarn (Erosion, Akkumulation)  Auswirkungen durch Änderungen des Seegangs als Folge des Tunnel/Brückenbaus (unbedeutende Veränderungen der Hydrographie)	LITPACK MIKE 3 FM HD und MIKE 21 SW WAMIT
<b>Benthische Flora</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation  Auswirkungen der Sedimentverdriftung	Kartierung der benthischen Flora im Fehmarnbaltgebiet  Auswirkungen durch suspendiertes Sediment aus (projektbedingten) Sedimentverdriftungen auf benthische Makroalgen und Seegras	GAM Ausbreitungsmodell  MIKE 3 ECO Lab (Wassersäule und benthische Flora) MIKE 3 FM HD MIKE 3 MT Dynamisch, 3D
<b>Benthische Fauna</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation	Kartierung der benthischen Fauna im Fehmarnbaltgebiet	GAM Ausbreitungsmodelle
<b>Miesmuscheln</b> Auswirkungen durch Sedimentverdriftung	Auswirkungen durch suspendiertes Sediment aus (projektbedingten) Sedimentverdriftungen auf Muscheln	MIKE 3 ECO Lab (Wassersäule und Muscheln) MIKE 3 FM HD MIKE 3 MT Dynamisch, 3D
<b>Fische</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation	Verfolgung der Herkunft von Fischlarven und Laich im Fehmarnbaltgebiet während der Bestandaufnahmen	MIKE 3 ECO Lab (IBM Version) MIKE 3 FM HD: Dynamisch, 3D
	Kartierung der bevorzugten Habitate/Lebensräume ausgewählter Fischarten	HSI-Modelle Angewendete (Modell)daten zur Hydrographie, Wasserqualität und benthischen Habitaten Statisch, 2D
<b>Auswirkungen von Veränderungen der Habitate/Lebensräume</b>	Auswirkungen auf Fische als Folge von Veränderungen der von Fischen genutzten Habitate/Lebensräume (darunter Makroalgen, Seegras, Muscheln)	HSI-Modelle Angewendete (Modell)daten zur Hydrographie, Wasserqualität und benthischen Habitate Statisch, 2D
<b>Wasservögel</b> Basis/Bestands/Ausgangssituation	Verteilung, Größe der Bestände und Dichte der Wasservögel im Fehmarnbaltgebiet	GAM Verteilungsmodell Semi-dynamisch, 2D (statistisch) Anwendt data fra MIKE 3 FM HD og MIKE 3 ECO Lab Muslinger
<b>Basis/Bestands/Ausgangssituation und Klimawandel</b>	Vorhersage der zukünftigen Verteilung und Dichte von Wasservögeln in der Ostsee unter Berücksichtigung des erwarteten Klimawandels (zwei Perioden modelliert: 2005 - 2034 und 2065 - 2095; keine feste Querung)	Climate Niche Models Statisch, 2D (statistisch)
<b>Eiderenten</b> Auswirkungen des Baus und der Bauarbeiten	Auswirkungen des Baus und Störungen durch Bauarbeiten von Eiderenten im Fehmarnbalt (Fitness und Überleben)	IBM Eiderenten (mit der Plattform MORPH) Dynamisch, 2D

Betrachtete Schutzgüter	Modellierte Aspekte	Angewendete Modelle/Modellplattformen
Meeressäuger Basis/Bestands/Ausgangssituation	Berechnung der Gesamtpopulation und Verteilung von Schweinswalen im Fehmarnbeltgebiet anhand der durchgeführten Zählungen	GAM Ausbreitungsmodell Statisch, 2D

Abkürzungen: HD = Hydrographie. CFD = Computational Fluid Dynamics. GAM = Generalized Additive Model. I HSI = Habitat Suitability Indices. IBM = Individual Based Model

**Tabelle 6: Ausgewählte nationale und internationale Referenzprojekte zur Modellanwendung und zum Monitoring der DHI-Gruppe**

Referenzen – Modellanwendung		
Name (Auftraggeber)	Beschreibung	Auftragswert (EUR)
<b>Deutschland</b>		
Perspektive Lebendige Unterems – Teilprojekt Wasserbau (WWF Deutschland)	Hydro- und morphodynamische Untersuchung verschiedener Sanierungsmaßnahmen zur Reduktion hoher Schwebstoffkonzentrationen mit Hilfe eines numerischen 3D-Modells der Unterems	>EUR 60.000
Hydromorphologische Untersuchung zur Optimierung von Maßnahmen zur Reduktion des Sedimenteintrags im Sperrwerk Estemünde (Hamburg Port Authority)	Entwicklung eines Sedimentmanagementkonzept mittels einer hydro-morphologischen 3D-Untersuchung zu Wirkungen eines Spülbetriebs am Sperrwerk	>EUR 30.000
Entwicklung einer Reparaturwerft auf Willingdon Island, Cochin (Indien) – Hydro- und morphodynamisches Gutachten (INROS Lackner SE)	Hydro- und morphodynamische Untersuchung für den Bau einer Reparaturwerft mit Schiffsliift in Cochin	>EUR 150.000
Neubau eines Vielweckhafens an der Elbe in Brunsbüttel – Hydro- und morphodynamisches Gutachten (Merkel Ingenieur Consult)	Hydro- und morphodynamische Untersuchungen zur Optimierung der Hafengeometrie und Fahrrinne	>EUR 40.000
<b>Andere Länder</b>		
Øresund Querung, UVP (Øresundskonsortiet)	Grundlagen- und Umweltverträglichkeitsprüfungen in Verbindung mit dem Bau der Øresund Querung zwischen Schweden und Dänemark einschließlich der Modellierung der Hydrodynamik, der Sedimentverdriftung und der ökologische Auswirkungen	-
Water Framework modelling (Danish EPA)	Modellierung der Wasserqualität in den Dänischem Meeresengen und Fjorden, einschließlich der Sensitivitätsanalysen von Seegras auf Umweltbelastungen	>EUR 1 Million

Standort für Aquakultur in Dänischen Gewässern ( <i>Dänisches Amt für Umwelt</i> )	Auswahlprüfung der Standorte basierend auf hydrodynamischen Modellen und Wasserqualitätsmodellen	>EUR 150.000
Stad Schiffstunnel Projekt in Norwegen (Dr. Techn. Olav Olsen)	Modellierung der Auswirkungen auf die Hydrodynamik, Wasserqualität und den Lachs Larven Transport als Vorgabe für die Umweltverträglichkeitsprüfung	>EUR 150.000
Standort für Aquakultur in Norwegischen Fjords, Rogaland ( <i>Proactima A/S</i> )	Modellierung der Hydrodynamik und Verbreitung der Lachsläuse in Rogaland mit mehr als 20 Aquakulturfarmen	>EUR 100.000
DHI Vorhersage-System "Water Forecast Service" (mehr als 30 Modelle)	Vorhersage-System "Water Forecast Service" der Hydrodynamik und Wasserqualitätsbedingungen basierend auf DHI MIKE Modellen für mehr als 30 geografische Gebiete	>EUR 2 Million
Anholt Offshore Windpark, UVP ( <i>Rambøll A/S</i> )	UVP Studien bezogen auf Ökologie, Habitate, Vögel, Säugetiere, Meeresboden und Küstenbelange. DHI entwickelte ein integriertes hydrodynamisches und ökologisches Konzeptmodell und wandte dies auf DHI's numerischen Modelle für die hydrodynamischen Bedingungen, Sedimentverbreitung und Ökologie an.	>EUR 1 Million
<b>Referenzen – Monitoring</b>		
<b>Name (Auftraggeber)</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Auftragswert (EUR)</b>
Øresund Querung ( <i>Øresundskonsortiet</i> )	Monitoring der hydrodynamischen Bedingungen, Sedimentverdriftung und ausgewählten biologischen Parametern für die Verwendung bei den Studien zur Grundlagen- und Umweltverträglichkeitsprüfung für den Bau der festen Querung zwischen Schweden und Dänemark. Hoch frequentiertes „adaptives Monitoring“ und Modellierung zur kontinuierlichen Informationsbereitstellung der potenziellen Auswirkungen der Bauarbeiten	>EUR 10 Million
Nord Stream Pipeline ( <i>Nord Stream AG</i> )	Monitoring des suspendierten Sediments durch den Bau im Dänisch/Schwedischem Sektor, inkl. 4 online Bojen für Wellen-/Strömungs-/Trübungsmessungen und jährlichen Untersuchung im Feld für das Monitoring der benthischen Bedingungen (Sediment, Chemie, Fauna).	>EUR 2 Million
Bjørnafjorden ( <i>Norwegische öffentliche Straßenverwaltung</i> )	Bedarfsgesteuertes Felduntersuchungsprogramm von Wellen, Strömung und Tide in einem 600 m tiefen norwegischen Fjord	>EUR 2 Million
Sedimentverdriftung für OWP Innogy 2&3 ( <i>Enova Energiesysteme GmbH &amp; Co. KG</i> )	Messungen und Bewertung der Sedimentverdriftung der Erdbauarbeiten für die Fundamentierung in Offshore Windparks	>EUR 0,5 Million
Offshore Windparks, BSII und BSIII, Polen, Umwelt-verträglichkeitsprüfung ( <i>Baltyk Środokowy II Sp z o.o.</i> )	Monitoring der marinen Säuger, Unterwasser-schall, Seevögel und UVP für alternative Wind-	>EUR 2 Million

# Femern

## Sund $\approx$ Bælt

	parklösungen. Verantwortlich für marine physikalische, chemische und biologische Bedingungen (QA)	
Sedimentverdriftung Ajax R ( <i>Rhode Nielsen A/S</i> )	Messungen der Sedimentverdriftung rund um den Schaufelbagger Ajax R	>EUR 10.000
Nord-Ostsee-Kanal Sedimentablagerung ( <i>WSA, Kiel Holtenau</i> )	Online Monitoring der Trübung in Verbindung mit der Verklappung von gebaggertem Sediment	>EUR 2 Million