

**Hydromorphologische Wirkung der
Verbringung von Baggergut zur
Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“
bei Elbe-km 749**

B3955.03.06.10003

**Hydromorphologische Wirkung der
Verbringung von Baggergut zur
Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“
bei Elbe-km 749**

Auftraggeber: Hamburg Port Authority AöR

Auftrag vom: 02.07.2020

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.06.10003

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Julia Benndorf, M.Sc.
Dipl. Ing (FH) Ingrid Uliczka
Sebastian Fürst, M.Sc.

Hamburg, 10.12.2021

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

Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde von der Hamburg Port Authority (HPA) beauftragt, die hydromorphologische Wirkung der Verbringung von Baggergut bei der Verbringstelle (VS) „Hamburger Außenelbe“ bei Elbe-km 749 zu untersuchen und Daten aus numerischen Modelluntersuchungen für die Erstellung einer Auswirkungsprognose zur Verfügung zu stellen.

Es sind bis zu 9 Monate mit realen Randwerten aus dem Jahr 2016 unter Berücksichtigung möglichst aktueller Topographiedaten simuliert worden. Die Ausbreitung des Baggergutes ist von der Sinkgeschwindigkeit der jeweiligen Fraktionen abhängig. Feine Fraktionen werden verstärkt von der Verbringstelle in die Nordsee ausgetragen, während die gröberen der betrachteten Fraktionen zu einem großen Teil im Mündungstrichter der Elbe abgelagert werden. Als Gebiete, in denen vermehrt Baggergut sedimentiert, können strömungsberuhigte Bereiche abseits der Fahrrinne, Hafenbecken sowie teilweise trockenfallende Wattflächen identifiziert werden. Dies betrifft auch den Bereich der Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel. Das Baggergut verhält sich analog zum Hintergrundsediment mit ähnlichen physikalischen Eigenschaften. In der morphodynamisch aktiven Außenelbe bedeutet dies, dass Sedimente ständigen Prozessen von Sedimentation und Erosion unterliegen und somit auch zunächst abgelagerte Sedimente remobilisiert und weiter transportiert werden können.

Nur ein geringer Anteil des eingebrachten Baggergutes befindet sich am Ende der Simulationszeit als Schwebstoff in der Wassersäule. Der Anteil von Baggergut innerhalb der oberen Schicht des Modellbodens bewegt sich unter Berücksichtigung der im Modell angesetzten Baggergutmengen nach 9 Monaten Simulationszeit auch in stärker beaufschlagten Teilgebieten im einstelligen Prozentbereich. Zusätzlich zu dem Austrag von sehr feinen Fraktionen ist das Baggergut also soweit verdünnt, dass es sich in das Hintergrundgeschehen eingefügt hat.

Im Vergleich zum analog untersuchten VSB 730/740 (BAW 2021) wird Baggergut, insbesondere die sehr feinen Fraktionen, aus der VS 749 etwas stärker über den Seerand aus dem Modellgebiet transportiert und etwas weniger in die Elbmündung hinein. Beim Vergleich der Sedimentmassen ist erkennbar, dass die Ablagerungen von Baggergut aus der VS 749 zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel etwas geringer, im Bereich zwischen niedersächsischem Ufer und Neuwerk etwas größer sind als durch Baggergut aus dem Verbringstellenbereich 730/740.

Anhand der durchgeführten Systemstudien ist unter Berücksichtigung der beschriebenen Charakteristik des Gebietes eine aussagekräftige Beurteilung für reale zukünftige Situationen möglich. Die tatsächlichen Mengen und die Zusammensetzung sind von zukünftigen hydrologischen und meteorologischen Entwicklungen und der Unterhaltungspraxis abhängig.

Durch Umlagerungen im Mündungsbereich, wie z. B. bei der VS 749, werden im Vergleich zu weiter stromauf gelegenen Verbringstellen Baggerkreisläufe verlängert, unterbrochen oder verhindert. Austrag über den Seerand führt zu einer verringerten Sedimentation in der Elbe. Dies kann zu einer Entlastung der Baggermengen in der Unterelbe beitragen und ist bei der Entwicklung einer flexiblen und adaptiven Sedimentmanagementstrategie zu berücksichtigen. Eine solche

Strategie sollte sich an den dynamischen vorherrschenden und erwarteten Systemzuständen orientieren und dadurch zielgerichtet den Stromauftransport von Feinsediment verringern. Als Randbedingungen für Umlagerungen sind somit zustandsbasierte Leitlinien bessere Managementindikatoren als starre Auflagen. Diese sollten sich an den natürlichen Prozessen eines Tideflusses und den Eigenschaften des Naturraumes orientieren und können durch Monitoringprogramme unterstützt werden.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2 Bearbeitungskonzept	2
3 Modellaufbau	4
3.1 Topographie	4
3.2 Simulations- und Analysezeiträume	5
3.3 Randwerte	6
3.3.1 Seeseitiger Rand	6
3.3.2 Oberwasserzufluss	7
3.3.3 Meteorologische Daten	8
3.4 Sedimentinventar	10
3.5 Baggergut	12
3.6 Analyse und Bewertung	13
3.6.1 Beurteilung der Auswirkungen der Sedimentmasse am Boden	15
3.6.2 Beurteilung der Auswirkungen des Schwebstoffgehaltes	15
3.6.3 Hinweise zu den verwendeten Bilanzräumen	16
4 Charakterisierung des Verbringstellenbereiches „Hamburger Außenelbe“	18
4.1 Hydrodynamik	19
4.2 Morphodynamik	20
4.3 Beschreibung der VS „Hamburger Außenelbe“ und Vergleich mit dem VSB 730/740	21
5 Systemstudien	23
5.1 Simulation der Umlagerung von Baggergut	23
5.2 Einfluss des Oberwasserzuflusses	25
5.3 Einfluss des Seegangs und von Sturmfluten	25
5.4 Skalierbarkeit der Ergebnisse	26
6 Ergebnisse	27
6.1 Schwebstoffgehalt	28
6.2 Sedimentablagerung am Boden	36
6.3 Gesamtbilanz	40
6.4 Vergleich zwischen VS „Hamburger Außenelbe“ und VSB 730/740	44
7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse	47
8 Literaturverzeichnis	52
9 Anlagen	55

9.1	Mathematische Simulationsverfahren	55
9.2	Tabellarische Auflistung aller Bilanzräume	58
9.3	Weitere Abbildungen in räumlichen Ausschnitten	60
9.3.1	Sedimentablagerungen am Boden	60
9.3.2	Schwebstoffgehalte	67

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Modellgebiet mit Topographie (Wassertiefen in m NHN) und Lage der untersuchten Verbringstelle (rot markiert)	4
Bild 2: Spring- (rot) und Nipp- (grün) Phasen am Pegel St. Pauli	5
Bild 3: Messwerte des Wasserstandes bei Helgoland, Cuxhaven und St. Pauli während der Sturmflut Ende Dezember 2016 (Datenquelle: WISKI)	6
Bild 4: Häufigkeitsverteilung des am Pegel Neu Darchau ermittelten täglichen Abflusses von 1995 bis 2019	7
Bild 5: Tageswerte des Oberwasserzuflusses (Neu Darchau) und des Salzgehaltes (Geesthacht) der Elbe für das Jahr 2016	8
Bild 6: Prozentuale Verteilung der Windrichtungen und -geschwindigkeiten für verschiedene Zeiträume an der Windmessstation Cuxhaven des Deutschen Wetterdienstes	9
Bild 7: Anfängliches Sedimentinventar im Modellgebiet	11
Bild 8: Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten und Konzentration in verschiedenen Ästuaren entlang der Deutschen Bucht	11
Bild 9: Bilanzpolygone für den gesamten Untersuchungsraum	17
Bild 10: Bilanzpolygone in der Außenelbe	17
Bild 11: Lage und Bezeichnung der betrachteten Verbringstelle in der Hamburger Außenelbe (VS 749) im Vergleich zu den VS 738_4 und 738_5 (in rot) und der Elbe-km (in weiß)	18
Bild 12: Mittlere Stauwasserdauer in der Außenelbe bei Flutstromkenterung im Zeitraum snz07-snz24	19
Bild 13: Differenzen zwischen den Jahrestopographien 2019 und 2012	20
Bild 14: Lage der VS "Hamburger Außenelbe" und VSB 730/740 (in rot) vor der Modelltopographie	21
Bild 15: Elemente der VS 749	22
Bild 16: Maximaler Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fraktionen in der Außenelbe im Zeitraum snz07-snz10 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	29
Bild 17: Advektiv transportierte Rest-Sedimentmenge (Mittelwert) der einzelnen Baggergut-Fraktionen in der Außenelbe aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	30
Bild 18: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes für alle Baggergut-Fraktionen über die Zeit für Bilanzraum "51_Nahbereich_VS749_HPA" aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	31
Bild 19: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes für alle Baggergut-Fraktionen über die Zeit für Bilanzraum "25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO" aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	32

Bild 21: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für Bilanzraum "51_Nahbereich_VS749_HPA" aus dem Lauf V738_5_Q360_54Uml	33
Bild 20: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für Bilanzraum "25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO" aus dem Lauf V738_5_Q360_54Uml	34
Bild 22: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	34
Bild 23: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	35
Bild 24: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen in der Außenelbe nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	37
Bild 25: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen über 9 Monate für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG; oben: 95. Perzentil, unten: 50. Perzentil	38
Bild 26: 95. Perzentil der Sedimentmasse als Anteil der Summe der Baggergut-Fraktionen an der Summe aller Fraktionen innerhalb der oberen Bodenschicht über 9 Monate für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	39
Bild 27: Großräumige Bilanzräume für das Modellgebiet	40
Bild 28: Gesamtbilanz nach 9 Monaten Simulationszeit für die Summe der Baggergut-Fraktionen, aggregiert über die großräumigen Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	41
Bild 29: Gesamtbilanz der Sedimentmasse am Boden nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fraktionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut	42
Bild 30: Gesamtbilanz des Schwebstoffgehaltes nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fraktionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut	43
Bild 31: Gesamtbilanz des Transportes über die Austauschflächen nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fraktionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut	43
Bild 32: Differenz der Sedimentmasse am Boden aus Lauf V749_HPA_Qvar_SG und Lauf V738_5_Qvar_SG in der Außenelbe nach 9 Monaten Simulationszeit	45
Bild 33: Natürliche Prozesse in einem Ästuar	56
Bild 34: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	60

Bild 35: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	61
Bild 36: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	61
Bild 37: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	62
Bild 38: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	62
Bild 39: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	63
Bild 40: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	63
Bild 41: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	64
Bild 42: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	64
Bild 43: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	65
Bild 44: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	65
Bild 45: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG	66
Bild 46: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	67
Bild 47: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	67
Bild 48: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	68
Bild 49: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	68
Bild 50: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	69
Bild 51: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml	69

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Vergleich der Korngrößen nach der Udden-Wentworth-Skala und DIN EN ISO 14688	12
Tabelle 2: Korndurchmesser, Sinkgeschwindigkeiten, Transportmodus und prozentualer Anteil der Baggergutfraktionen im Modell, Einteilung nach Udden-Wentworth-Skala	13
Tabelle 3: Vergleich der Flächen und Baggergut-Mengen für die Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ mit den Verbringstellen 738_4 und 738_5	21
Tabelle 4: Prozentuale Anteile am Gesamt-Baggergut je BZR für Sedimentmasse, Schwebstoffgehalt und Transporte (Pfeil zeigt Transportrichtung an, vgl. auch Bild 28) zwischen den BZR für Lauf V749_HPA_Qvar_SG und Lauf V738_4_Qvar_SG	46
Tabelle 5: Nummern, Bezeichnungen und Flächeninhalte der Bilanzpolygone	58

Abkürzungsverzeichnis

AP	Auswirkungsprognose
BA	Baggerabschnitt
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BZR	Bilanzraum
GÜBAK	Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern
HPA	Hamburg Port Authority
MoNa	Monitoring Nassbaggerarbeiten (System der WSV zur Abrechnung von Nassbaggerarbeiten)
Q	Durchfluss, hier: Oberwasserzufluss
TE3	Verbringstelle bei der Tonne E3 im Küstenmeer
TS	Trockensubstanz
VS	Verbringstelle
VSb	Verbringstellenbereich
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Hamburg Port Authority (HPA) prüft derzeit die Eignung einer neuen Verbringstelle (VS) für Baggergut aus der Delegationsstrecke der Elbe in der Elbmündung auf Hamburger Gebiet bei Elbe-km 749 (kurz: 749 oder „Hamburger Außenelbe“). Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde dafür von der HPA mit der Durchführung von Systemstudien auf Basis von hydrodynamischen Modellierungen zur hydromorphologischen Wirkung der neuen Verbringstelle beauftragt.

Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung einer Verbringung von Feinsedimenten zur VS 749. Die in diesem Gutachten beschriebenen Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Auswirkungsprognose der HPA. Hierfür rechnet die HPA die in diesem Gutachten beschriebenen Modellergebnisse auf die geplanten Mengenszenarien hoch und bewertet die daraus resultierenden Auswirkungen. Dieses Vorgehen orientiert sich an den Untersuchungen von BAW und BfG zum Verbringstellenbereich (VSB) 730/740 (BAW 2021; BfG 2021).

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass auf Basis von wenigen Simulationsläufen Untersuchungen für verschiedene Mengenszenarien oder Baggergutzusammensetzungen durchgeführt werden können, ohne dass diese explizit im numerischen Modell simuliert werden mussten. Die in diesem Gutachten zusammengefassten Systemstudien und Ergebnisse ermöglichen eine aussagekräftige Beurteilung der Auswirkungen von Baggergutverbringung in der VS „Hamburger Außenelbe“ für reale zukünftige Situationen.

In Abstimmung mit der HPA wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt und Ergebnisdaten übergeben. Das vorliegende Gutachten stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeiten der BAW dar und dient insbesondere der Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Modelluntersuchungen sowie des Systemverständnisses. Für die ökologischen und sonstigen Auswirkungen der Umlagerung von Baggergut bei der VS 749 wird auf die hierauf aufbauende Auswirkungsprognose der HPA verwiesen (HPA 2021).

2 Bearbeitungskonzept

Für die zukünftige Verbringung von Unterhaltungsbaggergut aus der Delegationsstrecke der Tideelbe ist von der Hamburg Port Authority (HPA) eine Untersuchung der hydromorphologischen Wirkung der Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ bei Elbe-km 749 bei der BAW in Auftrag gegeben worden. Diese dient als Grundlage der Auswirkungsprognose.

Dem heutigen Stand der Wissenschaft entsprechend werden für derartige Aufgabenstellungen wasserbauliche Systemanalysen mit mathematisch-numerischen Modellen durchgeführt. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse und damit der Prognosesicherheit ist abhängig von der Qualität und Vollständigkeit der in der mathematischen Formulierung erfassten physikalischen Prozesse, von der naturgetreuen Nachbildung des geometrischen Systems, sowie von den zur Verfügung stehenden Rand- und Anfangswerten.

Es wurden die morphologischen, hydrologischen und meteorologischen Verhältnisse aus dem Jahre 2016 zugrunde gelegt. Zusätzlich werden u. a. aktuelle Topographiedaten sowie geplante oder bereits in der Umsetzung befindliche Maßnahmen (z.B. die 2021 abgeschlossene Fahrrinnenanpassung) in der Modelltopographie berücksichtigt, sodass das Modell den planerischen Ist-Zustand abbildet.

Das vorliegende Gutachten ist wie folgt aufgebaut:

In **Kapitel 3: Modellaufbau** werden die grundlegenden Modelleigenschaften wie Topographiedaten, Anfangs- und Randwerte sowie das Sedimentinventar beschrieben und allgemeine Hinweise zur Analyse und Bewertung der Ergebnisse gegeben.

Anschließend folgt **Kapitel 4: Charakterisierung des Verbringstellenbereiches**, in dem auf die hydro- und morphodynamischen Eigenschaften der Außenelbe im Allgemeinen und der VS „Hamburger Außenelbe“ im Speziellen eingegangen wird.

In **Kapitel 5: Systemstudien** werden dann verschiedene Systemzustände systematisch untersucht und deren Einflüsse auf das Verhalten des Baggergutes miteinander verglichen. Dies beinhaltet die Simulation des Umlagerungsvorganges, den Einfluss des Oberwasserzuflusses (Q), des Seegangs und von Sturmfluten sowie eine Abschätzung in Bezug auf die Skalierbarkeit der Ergebnisse. Um die isolierten Einflüsse der jeweiligen Szenarien und Prozesse auf den Sedimenttransport beurteilen zu können, werden hier konstante Oberwasserzuflüsse eingesteuert. Diese Untersuchungen sind für ein gutes Systemverständnis notwendig.

Im Anschluss werden die **Ergebnisse der maßgeblichen Simulationsläufe** in **Kapitel 6** in Bezug auf die Sedimentmasse und den Schwebstoffgehalt zusammengefasst und für unterschiedliche Bilanzräume ausgewertet. Hier werden Simulationszeiträume von bis zu 9 Monaten mit realen Randwerten aus dem Jahr 2016 betrachtet und die Modellergebnisse exemplarisch beschrieben.

Abschließend erfolgt noch eine **Zusammenfassung und Beurteilung** der Ergebnisse. Das Bearbeitungskonzept wurde so entworfen, dass die Ergebnisse (Kapitel 6) mithilfe der zuvor beschriebenen Systemstudien (Kapitel 5) in Bezug auf die Baggergutmenge sowie Zusammensetzung variiert und der Einfluss verschiedener Szenarien beurteilt werden kann.

Die hier beschriebenen Modelluntersuchungen fließen in die Auswirkungsprognose der HPA ein (HPA 2021). Die HPA nutzt die hier gewonnenen Ergebnisse zum Verhalten von feinkörnigem Baggergut in Kombination mit Messdaten und Erfahrungswerten als Grundlage für weitere mathematische, ökologische und argumentative Auswertungen von möglichen Auswirkungen auf die Umwelt. Dieses Vorgehen bildet ausgehend von den numerischen Modellergebnissen, welche in diesem Gutachten beschrieben sind, eine durchgehende Kette an Untersuchungen bis hin zur Beschreibung und Bewertung von Auswirkungen auf der Basis des Standes der Wissenschaft.

3 Modellaufbau

Für die Untersuchung der zu beantwortenden Fragen wird ein bewährtes dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell verwendet, das die Tidedynamik und den Stofftransport in der Tideelbe simuliert. Die wesentlichen Grundlagen des Modellsystems sind in Anhang 9.1 zusammengefasst. Zur Modellsteuerung dienen die realen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen bzw. vereinfachte Annahmen zur Durchführung von Systemstudien. Die wichtigsten Modellparameter sowie Anfangs- und Randwerte werden im Folgenden näher erläutert.

3.1 Topographie

Die räumliche Ausdehnung des Modellgebietes mit der zu Grunde liegenden Topographie, sowie die Lage der hier untersuchten Verbringstelle bei Elbe-Kilometer 749, sind in Bild 1 zu sehen. Die Topographie beruht auf dem zum Untersuchungszeitpunkt aktuellsten DGM-W 2016 (WSV 2016). Zusätzlich werden Peildaten des Elbmündungsgebietes aus dem Jahr 2019 sowie die Tiefen- und Geometrieänderungen durch die 2021 abgeschlossene Fahrrinnenanpassung der Elbe berücksichtigt. Im Bereich der Unterwasserablagerungsfläche Medemrinne werden die ursprünglichen Planungsunterlagen zur Fahrrinnenanpassung an die tatsächlich eingebauten Strukturen angepasst, um einen Zustand herzustellen, der der zukünftigen Realität möglichst gut entspricht.

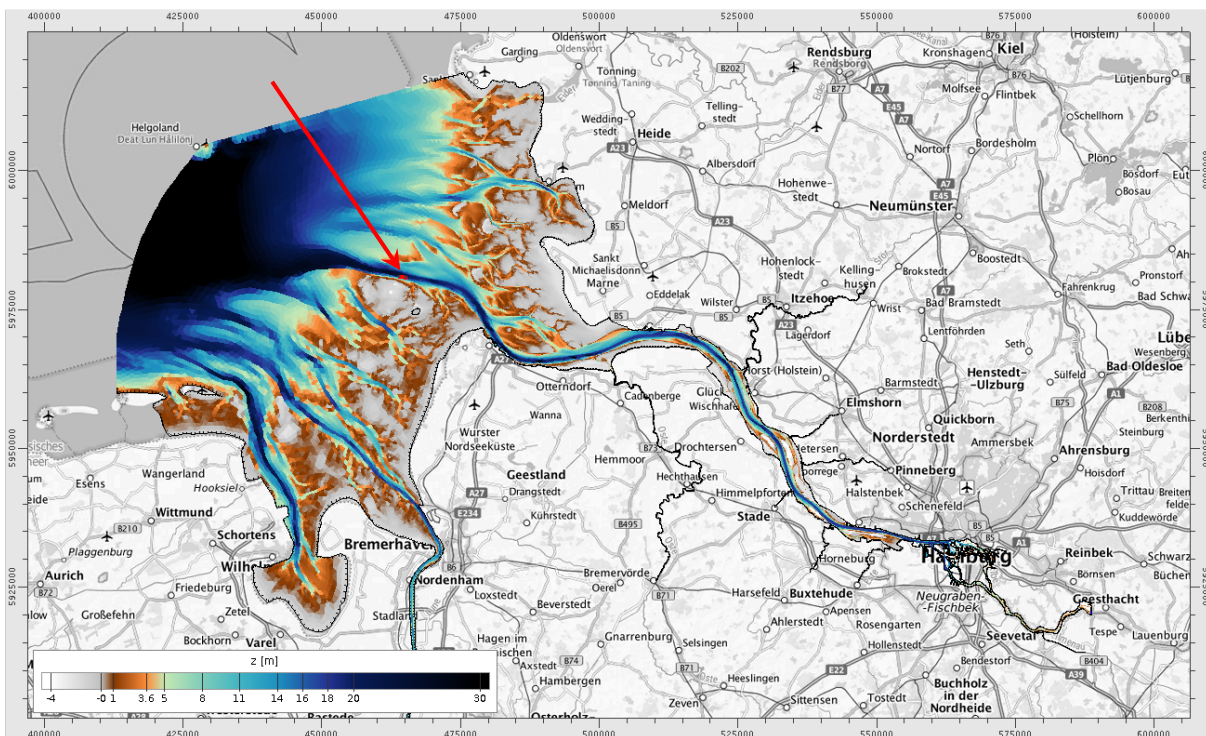


Bild 1: Modellgebiet mit Topographie (Wassertiefen in m NHN) und Lage der untersuchten Verbringstelle (rot markiert); Quelle der Hintergrundkarte: © GeoBasis-DE / BKG (2021)

3.2 Simulations- und Analysezeiträume

Für die durchzuführenden Untersuchungen steht ein kalibriertes Modell für das Jahr 2016 zur Verfügung. Damit liegen auch die Randwerte für die notwendigen Modellsimulationen des vorliegenden Gutachtens vor (Kapitel 3.3). Somit liegen alle Simulations-Zeiträume im Jahr 2016. Der Simulationszeitraum umfasst je nach Szenario 2 bzw. 9 Monate. Dabei basieren diese Simulationen auf den Daten des kalibrierten Modells von 2016. Der Simulationszeitraum für die Verdrift- und Systemstudien beginnt stets am 01.04.2016, wobei der Anfangszustand der Hydrodynamik aus einem zuvor durchgeführten Jahreslauf (Simulationszeitraum 01.01.-31.12.2016) übernommen wird. Daher kann das Modell als „eingeschwungen“ angesehen werden.

Für Analysen, die nicht zwingend anhand von Tidekennwerten durchgeführt werden müssen oder längere Zeiträume umfassen, werden die gesamten Simulationszeiten der Szenarien analysiert:

- 01.04. – 02.06.2016 (gesamter Simulationszeitraum für 2-Monats-Szenarien)
- 01.04. – 31.12.2016 (gesamter Simulationszeitraum für 9-Monats-Szenarien)

Zur Analyse von Tidekennwerten wird das Jahr in 24 Spring-Nipp-Zyklen (snz) unterteilt, sodass der Beginn des Analysezeitraumes zwischen der vorangehenden Nipptide und der zu analysierenden Springtide liegt und das Ende entsprechend zwischen der zu analysierenden Nipptide und der darauf folgenden Springtide liegt (siehe auch Bild 2). Da die Simulationen am 01.04.2016 beginnen, wird ein besonderer Fokus auf die darauf folgenden Spring-Nipp-Zeiträume gelegt. Zusätzlich werden längere Zeiträume innerhalb der Simulationszeiten betrachtet, welche ebenfalls in volle Spring-Nipp-Zeiträume eingeteilt werden können. Die im Folgenden häufig genannten und für die Analysen von Tidekennwerten verwendeten Zeiträume sind:

- snz07: 05.04. – 19.04.2016
- snz08: 20.04. – 04.05.2016
- snz09: 04.05. – 19.05.2016
- snz10: 19.05. – 02.06.2016
- snz07-snz10: 05.04. – 02.06.2016
- snz07-snz24: 05.04. – 26.12.2016

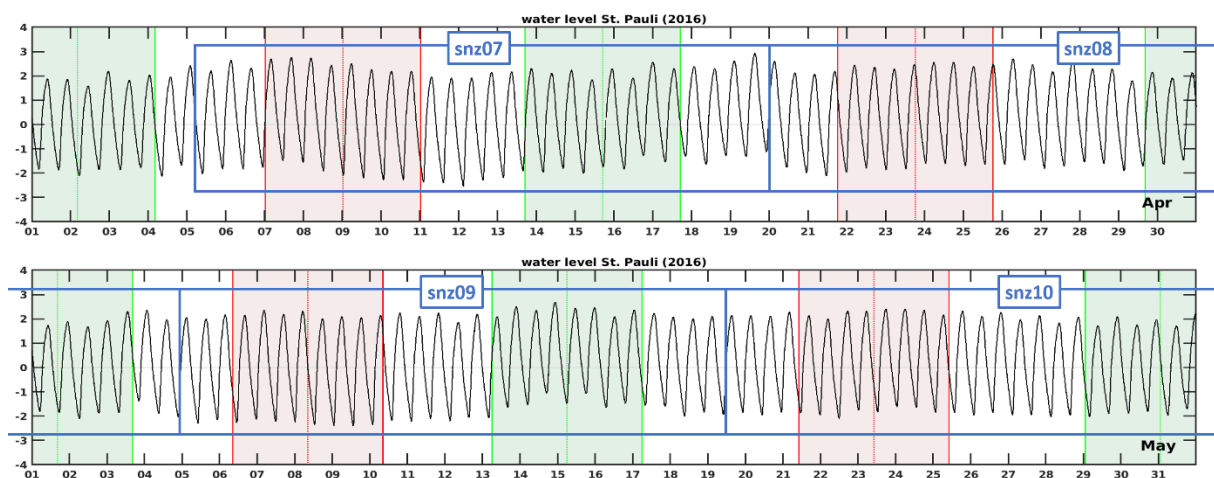


Bild 2: Spring- (rot) und Nipp- (grün) Phasen am Pegel St. Pauli, April-Mai 2016, blau: Spring-Nipp-Zyklen für die Analyse der Modellergebnisse

Der Zeitraum von zwei Monaten vom 01.04.-02.06.2016 wird für die Systemstudien verwendet. Bei Einbringen des Baggergutes in die Wassersäule treten die maximalen Schwebstoffgehalte während der Phase der Umlagerung auf, sodass hier dieser Zeitraum als ausreichend angesehen werden kann. Für die Beurteilung der Verteilung der Sedimentmasse am Boden wird ein Simulationszeitraum von 9 Monaten verwendet (01.04.-31.12.2016). Dieser Zeitraum deckt verschiedene hydrologische Zustände ab, welche für die Auswirkungen von Sedimentumlagerungen relevant sein können, wie zum Beispiel stürmische Phasen und die Vegetationsperiode.

3.3 Randwerte

3.3.1 Seeseitiger Rand

Am seeseitigen Rand werden Daten für Wasserstand, Salzgehalt und Temperatur aus einem Nord-seemodell der BAW (Hagen et al. 2019) als Eingangswerte verwendet. Für die Schwebstoffe wird am seeseitigen Rand eine Relaxationsrandbedingung angesetzt, welche dafür sorgt, dass der Schwebstoffgehalt, welcher ausgetragen wird, verzögert und abhängig von den Strömungsverhältnissen wieder eingetragen wird.

Am Ende des 9-monatigen Simulationszeitraumes tritt eine Sturmflut auf, welche für Hamburg als schwere Sturmflut klassifiziert wurde. Diese führt bei Helgoland zu einer Überschreitung des MHW um 1,84 m für das Hochwasser in der Nacht vom 26. auf den 27.12.2016. Die Überschreitung in Hamburg (Pegel St. Pauli) betrug 2,62 m (BSH 2016). Zeitreihen des gemessenen Wasserstandes für die Pegel Helgoland, Cuxhaven Steubenhöft und St. Pauli sind in Bild 3 dargestellt. Bereits die vorangegangenen Tiden in der Nacht vom 24. auf den 25.12.2016 überschritten das MThw deutlich, erfüllten jedoch noch nicht die Kriterien für eine Sturmflut.

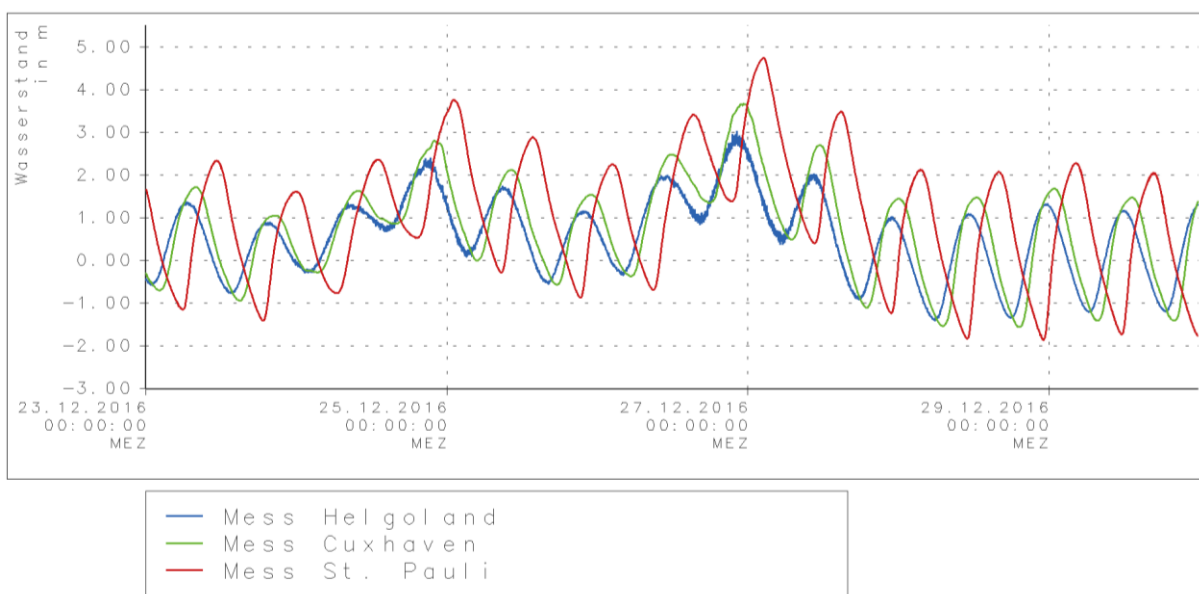


Bild 3: Messwerte des Wasserstandes bei Helgoland, Cuxhaven und St. Pauli während der Sturmflut Ende Dezember 2016 (Datenquelle: WISKI)

3.3.2 Oberwasserzufluss

Je nach Szenario (siehe Kapitel 2) wird ein konstanter oder variabler Oberwasserzufluss am Wehr Geesthacht in das Modell eingesteuert. Hierfür werden Messdaten des Pegels Neu Darchau herangezogen. Für die Nebenflüsse werden gemessene Abflüsse aus 2016 mit entsprechenden Salzgehalten (Messzeitreihen oder Jahresmittelwerte, je nach Verfügbarkeit) berücksichtigt.

Der für die Untersuchungen mit konstantem Oberwasserzufluss gewählte Abfluss von $360 \text{ m}^3/\text{s}$ ist der in dem betrachteten Zeitraum von 1995 bis 2019 am Pegel Neu Darchau am häufigsten eingetretene Wert (Klasse $325 - 375 \text{ m}^3/\text{s}$, dargestellt in Bild 4). Gleichzeitig kann dieser als niedriger Abfluss angesehen werden, da in dem betrachteten Zeitraum nur ca. 15 % der Ereignisse darunter liegen. Dieses Vorgehen stellt die Vergleichbarkeit zu früheren Untersuchungen, z.B. BAW (2006), sicher. Um auch Phasen mit anhaltend niedrigem Abfluss (wie aktuell seit 2013, vgl. Weilbeer et al. (2021) und BfG (2021)) nicht außer Acht zu lassen, wird außerdem eine Systemstudie mit unterschiedlichen Abflüssen von 180 bis $1080 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt (siehe Kapitel 5.2).

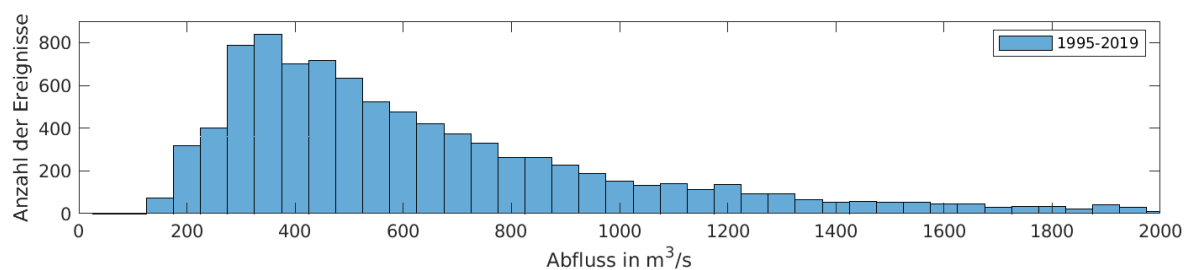


Bild 4: Häufigkeitsverteilung des am Pegel Neu Darchau ermittelten täglichen Abflusses von 1995 bis 2019

Für Szenarien mit variablem Oberwasserzufluss werden Messungen der Station Neu Darchau aus dem Jahr 2016 mit einem Zeitversatz von einem Tag am Modellrand in Geesthacht eingesteuert. Salzkonzentrationen werden aus der Leitfähigkeit berechnet (Bergemann 2005). Bild 5 zeigt die Tageswerte des Abflusses der Elbe in Neu Darchau im Verlauf des Jahres 2016. Zu Beginn des Simulationszeitraumes fällt der Oberwasserzufluss von $705 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $320 \text{ m}^3/\text{s}$ und im weiteren Verlauf des Sommers auch bis auf $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Für den Rest des Jahres bleibt der Oberwasserzufluss auf einem eher niedrigen Niveau (ab Anfang Mai treten keine Werte über $500 \text{ m}^3/\text{s}$ mehr auf). Das Abflussmittel für April bis Dezember 2016 beträgt $397 \text{ m}^3/\text{s}$, das sind nur 67,3% vom Langzeitmittel für diese Monate von $590 \text{ m}^3/\text{s}$. Es herrschen damit Bedingungen, die das Tidal Pumping, also den Transport von Sedimenten stromauf, verstärken.

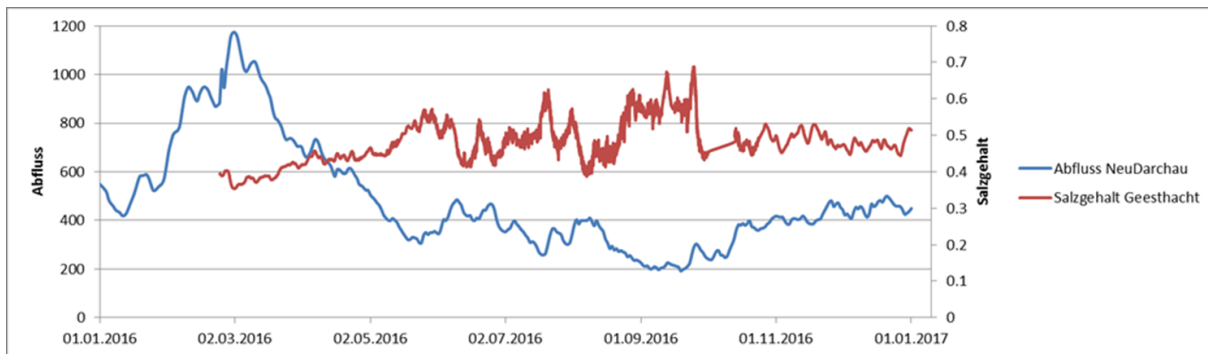


Bild 5: Tageswerte des Oberwasserzuflusses (Neu Darchau) und des Salzgehaltes (Geesthacht) der Elbe für das Jahr 2016

3.3.3 Meteorologische Daten

Als meteorologische Randwerte für Wind, Luftdruck und Temperatur werden Daten aus dem globalen Modell ICON des Deutschen Wetterdienstes (Reinert et al. 2021) verwendet. Bild 6 zeigt die prozentuale Verteilung der Windrichtungen und -geschwindigkeiten für verschiedene Zeiträume in Form von Windrosen an der Messstation Cuxhaven.

Anhand der Windrosen in Bild 6 ist erkennbar, dass das Jahr 2016 im Vergleich zum meteorologisch relevanten 30-jährigen Vergleichszeitraum von 1991 bis 2020 eine ähnliche Verteilung der Windrichtungen und -geschwindigkeiten aufweist. Es treten etwas häufiger als im langjährigen Zeitraum Südwest-Winde auf, dort jedoch eher mit niedrigen Windgeschwindigkeiten unter 6 m/s. Der Anteil der höheren Windgeschwindigkeiten ist mit dem langjährigen Mittel vergleichbar. Im Verlauf des Jahres gibt es jedoch Unterschiede. So treten in dem kurzen Simulationszeitraum von 2 Monaten (01.04. – 02.06.2016) deutlich häufiger Ostwinde auf, als in den anderen Jahreszeiten. Der lange Simulationszeitraum vom 01.04. bis zum 31.12.2016 entspricht hingegen wieder den Verhältnissen im 30-jährigen Mittel.

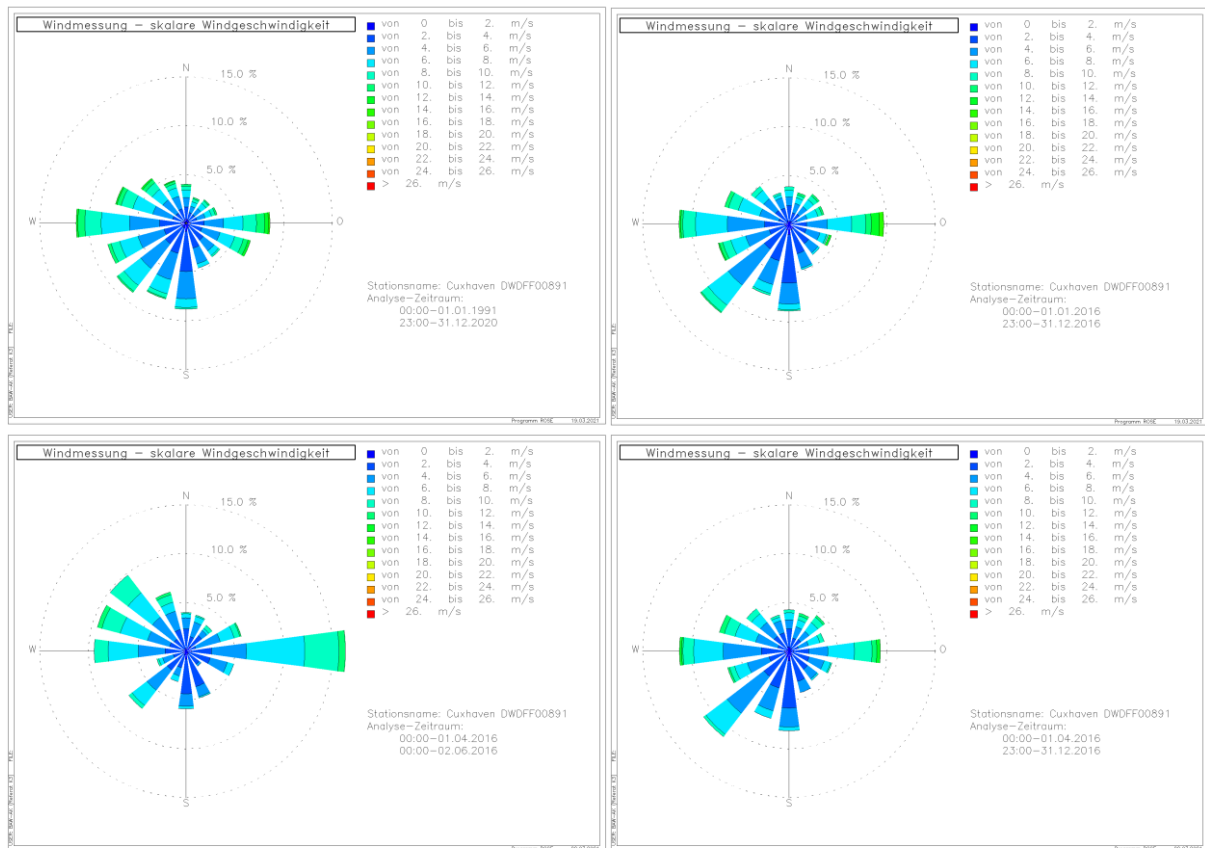


Bild 6: Prozentuale Verteilung der Windrichtungen und -geschwindigkeiten für verschiedene Zeiträume an der Windmessstation Cuxhaven des Deutschen Wetterdienstes (oben links: 1991-2020, oben rechts: Januar - Dezember 2016, unten links: April - Mai 2016, unten rechts: April - Dezember 2016) (Datenquelle: Deutscher Wetterdienst)

Laut Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016) war das Jahr 2016 sowohl deutschlandweit betrachtet als auch im Küstenraum ein eher warmes, niederschlagsarmes Jahr. Im Küstenraum zählt das Jahr 2016 zu den windschwachen Jahren – ein Trend, der seit der Jahrtausendwende anhält. Als Sturmereignisse an der Nordseeküste werden im betrachteten Zeitraum das Sturmtief Nannette am 20.11. sowie die Sturmtiefs Antje und Barbara um Weihnachten herum genannt. Letztere bewirkten an der Nordseeküste eine schwere Sturmflut (siehe auch Kapitel 3.3.1). Die Monate Januar, Februar und Dezember (wobei nur der Dezember in dem hier betrachteten Zeitraum liegt) wurden durch vorherrschende Winde aus West bis Süd bestimmt, während im Oktober Winde aus Nord bis Ost häufiger auftraten als im vieljährigen Mittel. (DWD 2016).

3.4 Sedimentinventar

Das anfänglich im Modell vorhandene Sedimentinventar wird aus dem funktionalen Bodenmodell generiert, ein Produkt des KFKI-Projektes „AufMod“ (Heyer und Schrottke 2013). Diese Daten sind durch Bodenproben aus dem Jahr 2018 ergänzt worden.

Das Sedimentinventar zu Beginn der Simulation ist in Bild 7 anhand des mittleren Korndurchmessers dargestellt. Das feinkörnigere Sedimentinventar (Darstellung: blau-grün-gelb) im Schlickfallgebiet in der Nordsee und in den Nebenbereichen der Tideelbe ist ebenso wie das sandigere Sedimentinventar (orange-rot) in der Fahrrinne deutlich zu erkennen.

Es werden zehn Sedimentfraktionen zur Beschreibung der räumlichen Verteilung der Oberflächensedimente des Bodenmodells verwendet. Die Einteilung der Sedimentfraktionen erfolgt mit Fokus auf die Sinkgeschwindigkeiten, welche in der Modellierung eine entscheidende Rolle spielen, anhand der Udden-Wentworth-Skala und erfasst Sedimente von „Very_Fine_Silt“ bis „Gravel“ in ihren jeweiligen Anteilen. Bild 8 zeigt Sinkgeschwindigkeiten und die jeweiligen Schwebstoffgehalte in verschiedenen Ästuaren entlang der Deutschen Bucht. Hier ist zu sehen, dass die verwendeten Klassen nach Udden-Wentworth die Schwebstoffbestandteile im Elbe-Ästuar gut abbilden. Die Einteilung nach DIN EN ISO 14688 erfolgt nach anderen Kriterien, sodass diese nicht direkt vergleichbar sind. Für die Modellierung ist es wichtig, insbesondere auch die Schluff-Fraktionen etwas feiner einzuteilen, um die Dynamik abbilden zu können. Ein Vergleich der Fraktionen nach Udden-Wentworth und DIN EN ISO 14688 ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Die gröberen (sandigen) sechs Fraktionen werden als Geschiebefracht transportiert, die feineren (schluffigen) vier Fraktionen in Suspension. Die Übergangsfraction „Very_Fine_Sand“ wird „intermittierend“, je nach hydrodynamischer Bedingung als Geschiebefracht oder auch in Suspension, transportiert. Die Parametereinstellungen wurden so gewählt, dass diese Fraktion leicht in Suspension gerät, also sehr mobil ist. Bei sehr hohen Konzentrationen wird die Sinkgeschwindigkeit von Schwebstoffen anhand des Ansatzes von Winterwerp verringert ($c_{gel} = 20 \text{ kg/m}^3$) (Winterwerp 2002). Die Wahl der Fraktionierung und der Transporteigenschaften sind das Resultat umfangreicher Voruntersuchungen (siehe z.B. BAW 2019).

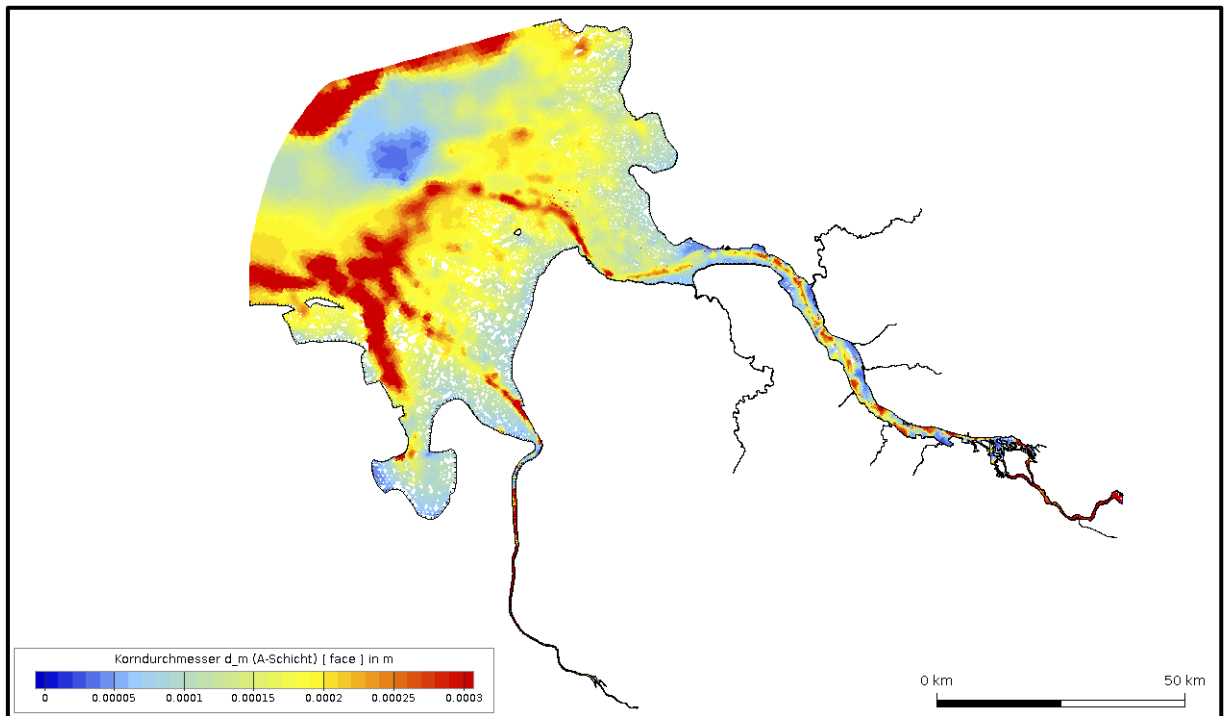


Bild 7: Anfängliches Sedimentinventar im Modellgebiet, dargestellt anhand des mittleren Korndurchmessers

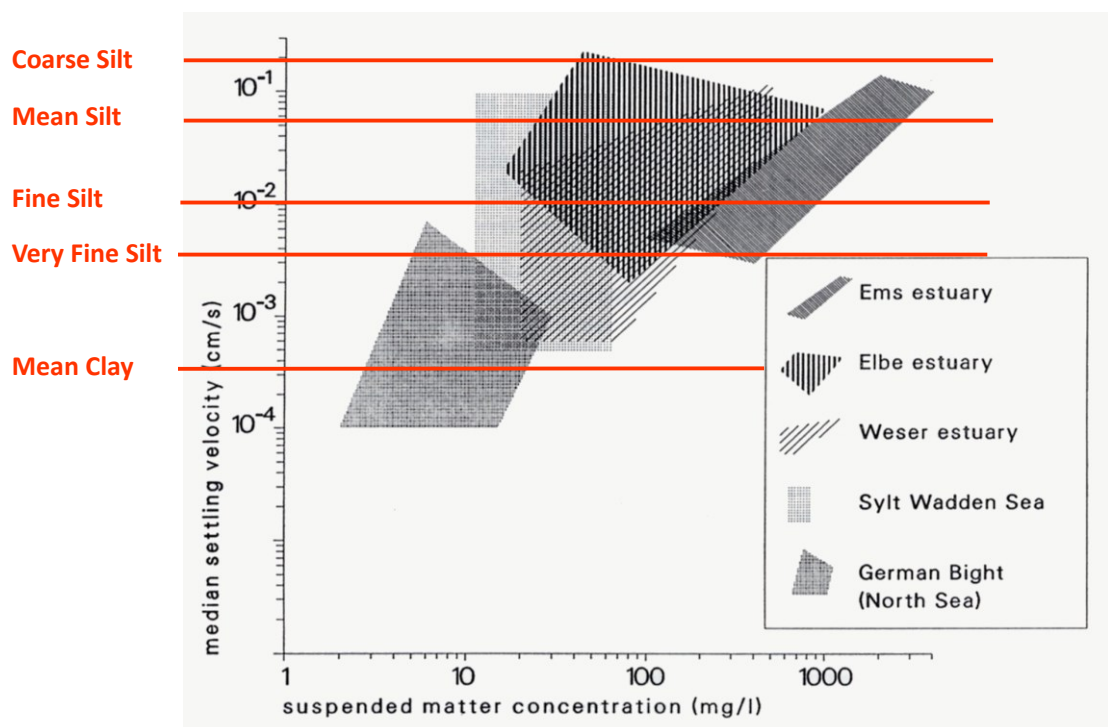


Bild 8: Sinkgeschwindigkeiten von Sedimenten und Konzentration in verschiedenen Ästuaren entlang der Deutschen Bucht; in rot: Fraktionen nach Udden-Wentworth (nach Mueller und Puls (1996), modifiziert)

Tabelle 1: Vergleich der Korngrößen nach der Udden-Wentworth-Skala und DIN EN ISO 14688

Bezeichnung der Fraktion nach Udden-Wentworth	Korngröße nach Udden-Wentworth [µm]	mittlere Sinkgeschw. nach Stokes bei 20 °C ($\rho=2650 \text{ kg/m}^3$) [mm/s]	Korngröße und Bezeichnung nach DIN EN ISO 14688 [µm]
Very Coarse Sand	1000–2000	2020	630–2000 (Grober Sand)
Coarse Sand	500–1000	500	
Medium Sand	250–500	120	200–630 (Mittelsand)
Fine Sand	125–250	30	63–200 (Feinsand)
Very Fine Sand	62,5–125	10	
Coarse Silt	31–62,5	1,9	20–63 (Grobschluff)
Medium Silt	15,6–31	0,51	
Fine Silt	7,8–15,6	0,11	6,3–20 (Mittelschluff)
Very Fine Silt	3,9–7,8	0,03	
			2–6,3 (Feinschluff)

3.5 Baggergut

Die Korndurchmesser, die Sinkgeschwindigkeiten und der Transportmodus der zusätzlich zum anfänglichen Sedimentinventar eingebrachten Sedimentfraktionen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Diese Zusammensetzung wird im Folgenden als „Baggergut“, in Abbildungen auch mit dem Kürzel „VS“ (VS steht hier für Verbringstelle, da diese Fraktionen ausschließlich dort eingebracht werden) bezeichnet. Für Details zur Einteilung der Klassen und zum Verhalten der einzelnen Fraktionen wird auf den vorangegangenen Abschnitt verwiesen.

Alle Fraktionen haben denselben prozentualen Anteil von 25 % am gesamten Baggergut. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit zwischen den Fraktionen gegeben und sie können je nach Anwendungsfall bzw. bei deutlich anders zusammengesetztem Baggergut unterschiedlich skaliert werden (vgl. BfG (2021)).

Tabelle 2: Korndurchmesser, Sinkgeschwindigkeiten, Transportmodus und prozentualer Anteil der Baggergutfraktionen im Modell, Einteilung nach Udden-Wentworth-Skala

Sedimentfraktion	Mittl. Korn- durchmesser	Sink- geschw.	Transportmodus	Proz. Anteil
Very_Fine_Sand_VS	94,0 µm	10,0 mm/s	Intermittierend	25 %
Coarse_Silt_VS	46,5 µm	1,9 mm/s	Suspension	25 %
Medium_Silt_VS	23,5 µm	0,5 mm/s	Suspension	25 %
Fine_Silt_VS	12,0 µm	0,1 mm/s	Suspension	25 %

Außerdem muss in Bezug auf das Baggergut noch zwischen verschiedenen Angaben für die Menge unterschieden werden. Im Modell wird die Trockensubstanz [t TS bzw. kg TS] verwendet, während für die Nassbaggerarbeiten Angaben in „m³ Laderaumvolumen“ üblich sind. Das Laderaumvolumen ist wiederum abhängig von dem Porenwassergehalt. Für die Aufteilung der Gesamt-Tonnen in Umlagerungsvorgänge zu je 9.000 m³ Laderaumvolumen in Kapitel 5.1 wurde eine mittlere Dichte des Sediments von 2,65 t/m³ und eine mittlere Dichte des Wasser-Sediment-Gemischs von 1,22 t/m³ angenommen. Damit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 0,353 t/m³ (Menge Sediment in t TS pro m³ Wasser-Sediment-Gemisch). Dies sind Mittelwerte aus Datensätzen der Unterhaltungsbaggertätigkeiten der WSV und dienen einer groben Abschätzung der Sedimentmenge pro Baggerladung. Die Werte für einzelne Umlagerungsvorgänge können in der Praxis davon abweichen. Im Modell ist schlussendlich nur die Menge an Baggergut in t TS relevant.

Die verschiedenen Methoden zur Einbringung von Baggergut sind in Kapitel 5.1 beschrieben und verglichen.

3.6 Analyse und Bewertung

Aus den synoptischen Ergebnissen der Simulationsrechnungen können grundsätzlich eine Vielzahl an tide- und tideunabhängigen Kennwerten der Wasserstände, der Strömung, des Salzgehaltes und der Schwebstoffverteilung errechnet werden, um das System zu beschreiben und die Wirkungen einer Maßnahme zu quantifizieren. Mit der Tidekennwertanalyse der BAW lässt sich an jedem Ort, für jede Tide und für jeden Parameter ein Wert berechnen (z.B. Tidehub oder maximale/mittlere/minimale Ebbestromgeschwindigkeit), mit dem anschließend für alle Tiden des Szenarios ein Mittelwert berechnet werden kann. Dementsprechend beinhaltet zum Beispiel die mittlere maximale Ebbestromgeschwindigkeit die über alle betrachteten Tiden gemittelten Werte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit jeder Tide. Langzeitkennwerte sind unabhängig vom Tideverlauf bestimmte Kennwerte für einen bestimmten Zeitraum, wie z.B. der Mittelwert, das Maximum oder Quantile.

Die Analyseverfahren und -parameter sind ausführlich auf den Internetseiten der BAW dokumentiert, siehe:

https://wiki.baw.de/de/index.php/Analyse_der_Berechnungsergebnisse

In dieser Untersuchung werden hauptsächlich die folgenden Parameter ausgewertet:

- Tidekennwerte des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit und der Bodenschubspannungen
- Synoptischer Schwebstoffgehalt
- Tidekennwerte des Schwebstoffgehaltes
- Langzeitkennwerte des Schwebstoffgehaltes
- Aggregierte Kennwerte des Schwebstoffgehaltes
- Synoptische Sedimentmasse am Boden

Dabei können diese Parameter für jedes Gitterelement einzeln (flächenhaft) herausgeschrieben oder räumlich (innerhalb von Bilanzräumen, siehe Kapitel 3.6.3) aggregiert werden. Zeitlich werden die Simulationsergebnisse zunächst synoptisch (für jeden Zeitschritt) vom Modell herausgeschrieben und später (in einem bestimmten Zeitraum) analysiert. Dies beinhaltet sowohl Tidekennwertanalysen, welche Kennwerte ereignisbezogen auswerten, als auch Langzeitanalysen bzw. statistische Analysen, wie z.B. Mittelwerte oder Quantile. Außerdem werden für bestimmte Bilanzräume während der Simulation in jedem (Sub-)Zeitschritt in jedem Element des Berechnungsgitters die exakten Sedimentmengen für eine Bilanzierung berechnet und in einer CF-netCDF-Datei¹ gespeichert. Das ist ein signifikanter Unterschied zu dem Vorgehen bei einer Tidekennwertanalyse, bei dem z.B. alle 10 Minuten ein synoptischer Datensatz geschrieben wird, der im Post-Processing entsprechend ausgewertet wird. Bei einem synoptischen Datensatz ist der Systemzustand nur zu genau diesem Zeitpunkt bekannt.

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

Auf der Grundlage der hier beschriebenen numerischen Modellierung und Analyse der Daten erstellt die HPA eine Auswirkungsprognose für die VS „Hamburger Außenelbe“. Die hier beschriebenen Ergebnisse liefern dafür die Grundlage, können aber nicht für sich alleinstehend für eine Prognose der Auswirkungen aufgrund der Umlagerung von Baggergut zu Rate gezogen werden. Hierfür sind die beschriebene Kette von aufeinander aufbauenden Untersuchungen sowie für jeden dieser Schritte eine fachlich fundierte gutachterliche Beurteilung wesentliche Bestandteile.

¹ This project took advantage of netCDF software developed by UCAR/Unidata
(www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/)

3.6.1 Beurteilung der Auswirkungen der Sedimentmasse am Boden

Die Sedimentmasse am Boden ist eine Möglichkeit, um die Verteilung des Baggergutes nach einer bestimmten Simulationszeit aus dem Modell abzulesen. Sie wird in der Einheit kg Trockensubstanz pro m² (kg/m²) angegeben, um von der Größe der einzelnen Rechengitterelemente unabhängige Angaben machen zu können und stellt immer eine Momentaufnahme dar. Der Unterschied zwischen der Trockensubstanz und dem Laderaumvolumen ist in Kapitel 3.5 beschrieben.

Um von der Flächenlast auf Ablagerungshöhen in Millimetern zu schließen, sind Annahmen zu treffen. Die Abschätzung der Mächtigkeit der abgelagerten Sedimentmassen hängt stark von dem Konsolidierungszustand der Sedimente ab, der sich vereinfachend über die Porosität ausdrücken lässt. Bei einer Korndichte von 2650 kg/m³ ergibt eine Akkumulation von Baggergut von 1 kg/m² rechnerisch eine mittlere Sedimentschichtdicke von $1/2650 \text{ m} = 0,38 \text{ mm}$. Unter der Annahme einer hohen Porosität $p = 0,62$ ergibt sich für eine Akkumulation von Baggergut von 1 kg/m² eine Sedimentschichtdicke von 1 mm. Unter der Annahme einer Porosität $p = 0,40$ ergibt sich für eine Akkumulation von Baggergut von 1 kg/m² eine Sedimentschichtdicke von 0,63 mm. Im Folgenden wird im Sinne einer Betrachtung auf der sicheren Seite von einer hohen Porosität ausgegangen, sodass vereinfacht ein Umrechnungsfaktor von $1 \text{ kg/m}^2 \cong 1 \text{ mm}$ angenommen werden kann.

3.6.2 Beurteilung der Auswirkungen des Schwebstoffgehaltes

Der Schwebstoffgehalt und -transport sind weitere wichtige Parameter zur Beurteilung der Auswirkungen von Baggergutverbringung. Der Schwebstoffgehalt variiert dabei nicht nur über die Zeit und die Fläche, sondern auch über die Wassertiefe. In den folgenden Untersuchungen werden, sofern nicht anders angegeben, tiefengemittelte Schwebstoffgehalte betrachtet.

Es muss zwischen dem Schwebstoffgehalt und der Trübung unterschieden werden. Letztere ist z.B. für die Beurteilung einiger ökologischer Auswirkungen relevant und lässt sich nicht mit dem gesamten Schwebstoffgehalt, welcher durch das Modell berechnet wird, gleichsetzen. In dem hier genutzten Modellaufbau wird die Fraktion „Very Fine Sand“ intermittierend, also sowohl als Geschiebe als auch als Schwebstoff transportiert. Diese Fraktion hat aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften (Korngröße und Sinkgeschwindigkeit) aber wenig bis keine Auswirkungen auf die Trübung in der gesamten Wassersäule, da der Transport überwiegend in Sohlhöhe (Kineke und Sternberg 1992) stattfindet.

Da die Auswirkungen von Veränderungen des Schwebstoffgehaltes stark von den einzelnen ökologischen Fachgebieten sowie von der Variabilität der Hintergrundkonzentration abhängig sind, können in diesem Gutachten keine Grenzwerte berücksichtigt werden. Für die ökologischen Auswirkungen wird auf die Auswirkungsprognose der (HPA 2021) verwiesen.

3.6.3 Hinweise zu den verwendeten Bilanzräumen

Die räumliche Aggregation innerhalb von Bilanzräumen (BZR) ist eine Methode, um die Modell-ergebnisse für bestimmte Gebiete, die nach unterschiedlichen Kriterien ausgewählt werden können, zusammenzufassen. Diese räumliche Zusammenfassung ist geeignet, um großräumige Verteilungen von Sediment sowie statistische Kennwerte zu ermitteln. Es ist jedoch zu beachten, dass lokale und kleinräumige Unterschiede davon abweichen können. Die Einteilung der im Folgenden genutzten Bilanzräume berücksichtigt die Anforderungen der Auswirkungsprognose wie z.B. eine differenzierte Erfassung der an die VS angrenzenden Flächen sowie Grenzen von Schutzgebieten und Wasserkörpern gemäß WRRL. Diese Bilanzräume sind in Bild 9 für das gesamte Modellgebiet und in Bild 10 für die Außenelbe dargestellt. Die Nummern und zugehörigen Bezeichnungen aller Bilanzräume sind in Tabelle 5 in Anhang 9.2 aufgelistet. Diese BZR entsprechen, mit Ausnahme der Nahbereiche der VS, den in BAW (2021) verwendeten BZR. In Kapitel 6.3 werden zusätzlich großräumige Bilanzräume (Bild 27) verwendet, um das generelle Verhalten sowie den Verbleib des Baggergutes zu beschreiben.

Die Ergebnisse für die Sedimentmasse und den Schwebstoffgehalt in den Bilanzräumen werden als räumliche Mittelwerte oder Perzentile angegeben. Das 95. Perzentil bedeutet zum Beispiel, dass nur auf 5 % der Fläche innerhalb des jeweiligen Bilanzraumes der angegebene Wert überschritten wird. Dies kann also als sehr hoher Wert betrachtet werden, gleichzeitig wird die Fläche des Bilanzraumes mitberücksichtigt. Im Folgenden werden darüber hinaus Angaben über die Summe der Baggergutfraktionen gemacht. Sofern diese für einzelne Bilanzräume berechnet werden, handelt es sich um eine Überschätzung der Ergebnisse, da in diesem Fall die 95. Perzentile der einzelnen Fraktionen aufsummiert werden, wodurch angenommen wird, dass diese sehr hohen Werte für alle Fraktionen an derselben Stelle innerhalb des Bilanzpolygons liegen. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Fraktionen ist diese Annahme jedoch unwahrscheinlich. Die Summe aller Fraktionen (einschließlich Hintergrundsediment) wird hingegen in der Analyse direkt berechnet, sodass es sich hier tatsächlich um das 95. Perzentil des gesamten Sedimentinventars handelt. Wenn nun also das Verhältnis aus der Summe der Baggergutfraktionen und der Summe aller Fraktionen gebildet wird, stellt dieses ebenfalls eine Überschätzung des Einflusses des Baggergutes dar, wodurch die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen.



Bild 9: Bilanzpolygone für den gesamten Untersuchungsraum

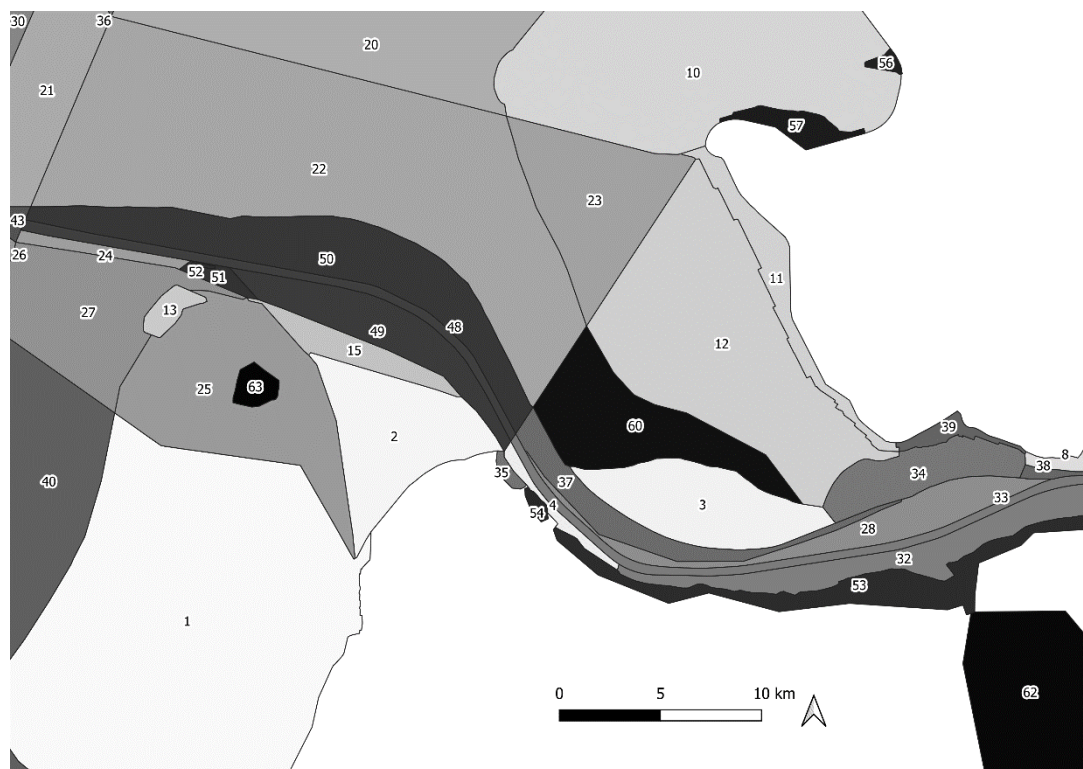


Bild 10: Bilanzpolygone in der Außenelbe

4 Charakterisierung des Verbringstellenbereiches „Hamburger Außenelbe“

Die Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ liegt auf Höhe von Elbekilometer 749, zwischen dem Scharhörner Watt und der Fahrrinne (siehe Bild 11). Sie liegt stromab des aktuell bereits genutzten Verbringstellenbereiches 730/740 (vgl. (BAW 2021; BfG 2021)) und auf der gegenüberliegenden Seite der Fahrrinne. Die geplante VS hat im Modell eine Fläche von ca. 189.000 m².

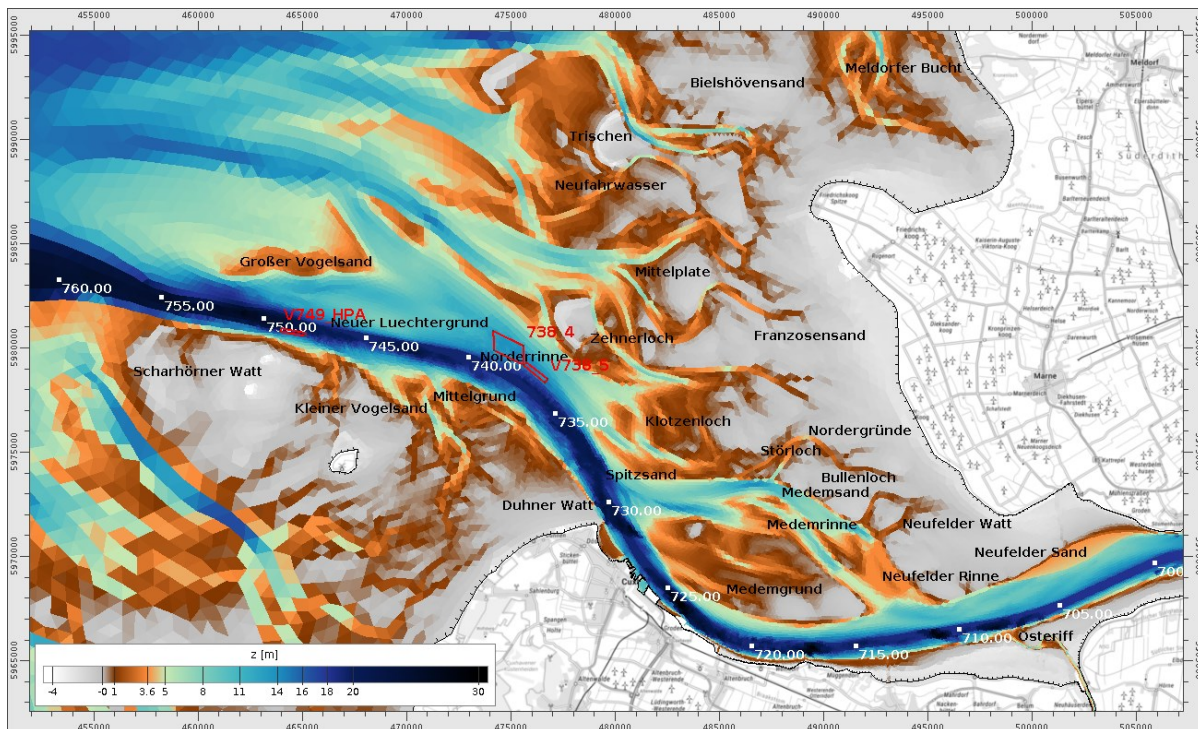


Bild 11: Lage und Bezeichnung der betrachteten Verbringstelle in der Hamburger Außenelbe (VS 749) im Vergleich zu den VS 738_4 und 738_5 (in rot) und der Elbe-km (in weiß)

Die hydromorphologische Entwicklung der Tideelbe wurde seit Jahrzehnten vom Menschen sowie durch natürliche Einflüsse geprägt und verändert. Durch die Anpassungen der Elbe an die Anforderungen der Schifffahrt wurden die Fließquerschnitte vergrößert. Außerdem gingen durch den Bau von Deichen sowie durch die Abdämmung von Nebelbecken und Nebenarmen tidebeeinflusste Vorlandflächen verloren. Seit Mitte der 50er Jahre bewirkt u.a. diese Entwicklung eine starke Vergrößerung des Tidehubs. Aus den „Gewässerkundlichen Informationen“ der HPA für den Pegel St. Pauli ist abzulesen, dass der Tidehub in den letzten 70 Jahren (1950 – 2020) von 2,40 m auf 3,78 m angewachsen ist (HPA 2020). Gleichzeitig verstärkte sich die Asymmetrie der Tidekurve, die sich durch einen steileren Flut- und flacheren Ebbeast auszeichnet. Dies führte zu einer Verstärkung des Flutstromes und somit auch zu einem verstärkten Stromauftransport von Sedimenten. Dieser sogenannte „tidal pumping“ Effekt hat zu stark erhöhten Baggermengen im Elbeästuar und zu einer Sedimentation in den Seitenbereichen in der Tideelbe beigetragen. Eine weitere Schwächung des stromab gerichteten Transports in den letzten Jahren kann auf die auffällig niedrigen Oberwasserzuflüsse seit 2014 sowie morphologische Veränderungen im Elbmündungsbereich zurückgeführt werden.

Für eine ausführliche Beschreibung der hydro- und morphodynamischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes wird auf BAW (2021, 2020, 2013) und Weilbeer et al. (2021) verwiesen. Im Folgenden werden einige Aspekte bezüglich der VS „Hamburger Außenelbe“ zusammengefasst.

4.1 Hydrodynamik

Die Wasserstände in der Außenelbe schwanken etwa zwischen -1,5 und +1,5 m NHN. Bei Extremereignissen wie Sturmfluten oder -ebben können diese Grenzen zeitweise auch deutlich über- oder unterschritten werden. Die Fahrrinne sowie die tieferliegenden Gebiete in der Außenelbe sind immer mit Wasser bedeckt. Wattflächen oder flachere Priele hingegen fallen regelmäßig, teilweise bei jeder Tide, trocken. Höher gelegene Flächen, z. B. in Ufernähe oder im Bereich der Insel Scharhörn, sind nur in Ausnahmefällen überflutet. In Bezug auf den Sedimenttransport ist zu beachten, dass Sedimentpartikel nur auf Flächen gelangen können, die auch überflutet werden. Sofern Partikel auf Flächen gelangen, welche nur selten überflutet werden, z.B. nur während einer Sturmflut, können sie dort lange liegen bleiben und auf dem Boden konsolidieren. Für die Sedimentation und Erosion spielen auch die Strömungsgeschwindigkeiten eine entscheidende Rolle (BAW 2021).

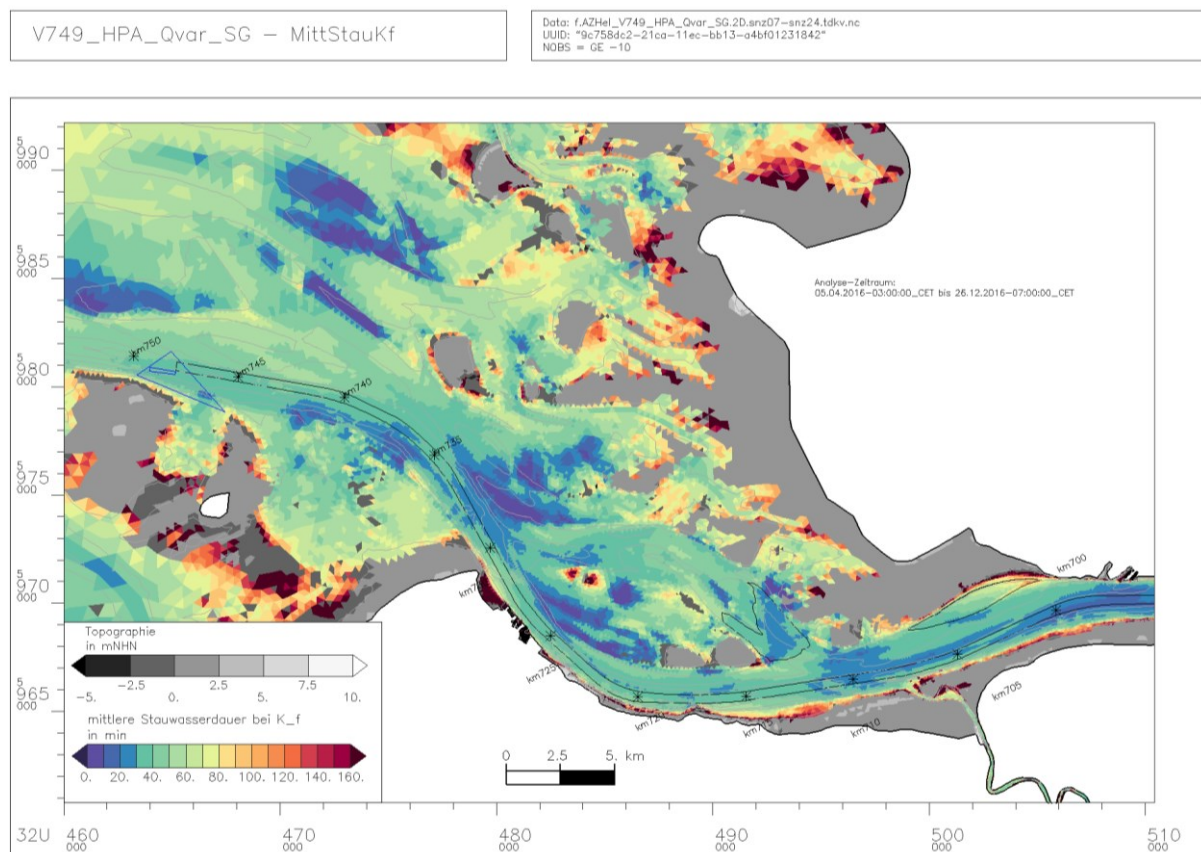


Bild 12: Mittlere Stauwasserdauer in der Außenelbe bei Flutstromkenterung im Zeitraum snz07-snz24

Stauwasserdauern geben einen Anhaltspunkt für die Phase eines milden Strömungsklimas, welches eine Sedimentation auch von Partikeln mit geringer Sinkgeschwindigkeit ermöglicht. Die mittlere Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung im Zeitraum snz07 bis snz24 sind für die Außenelbe in Bild 12 dargestellt. Die längsten Stauwasserzeiten sind anhand der gelben oder roten Färbung (teilweise mehrere Stunden) auf den Wattgebieten und im Uferbereich zu erkennen. Beispielfhaft sind hier die Grimmershörner Bucht und die Cuxhavener Häfen zu nennen, während in der Fahrrinne sowie im Verbringstellenbereich nur kurze Stauwasserdauern von unter einer Stunde auftreten.

Die weiteren Kenngrößen für die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Bodenschubspannungen und Schwebstoffgehalte gelten wie in BAW (2021) beschrieben.

4.2 Morphodynamik

In BAW (2021) ist darüber hinaus die morphodynamische Entwicklung der Außenelbe beschrieben. Hier soll nur auf die Differenzen zwischen den Jahrestopographien 2019 und 2012, welche in Bild 13 zu sehen sind, eingegangen werden. Dort ist erkennbar, dass auch an der Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ keine eindeutige Tendenz erkennbar ist, da sie von einem Depositionsbereich südlich, einem Erosionsbereich westlich und der Fahrrinne nördlich umgeben ist. Auch diese VS liegt, ebenso wie der VSB 730/740, innerhalb des morphodynamisch sehr aktiven Elbmündungsgebietes, sodass die Depositions- und Erosionsbereiche sich im Laufe der Zeit verschieben und zwischen einzelnen Jahren die Differenzen sehr unterschiedlich aussehen können.

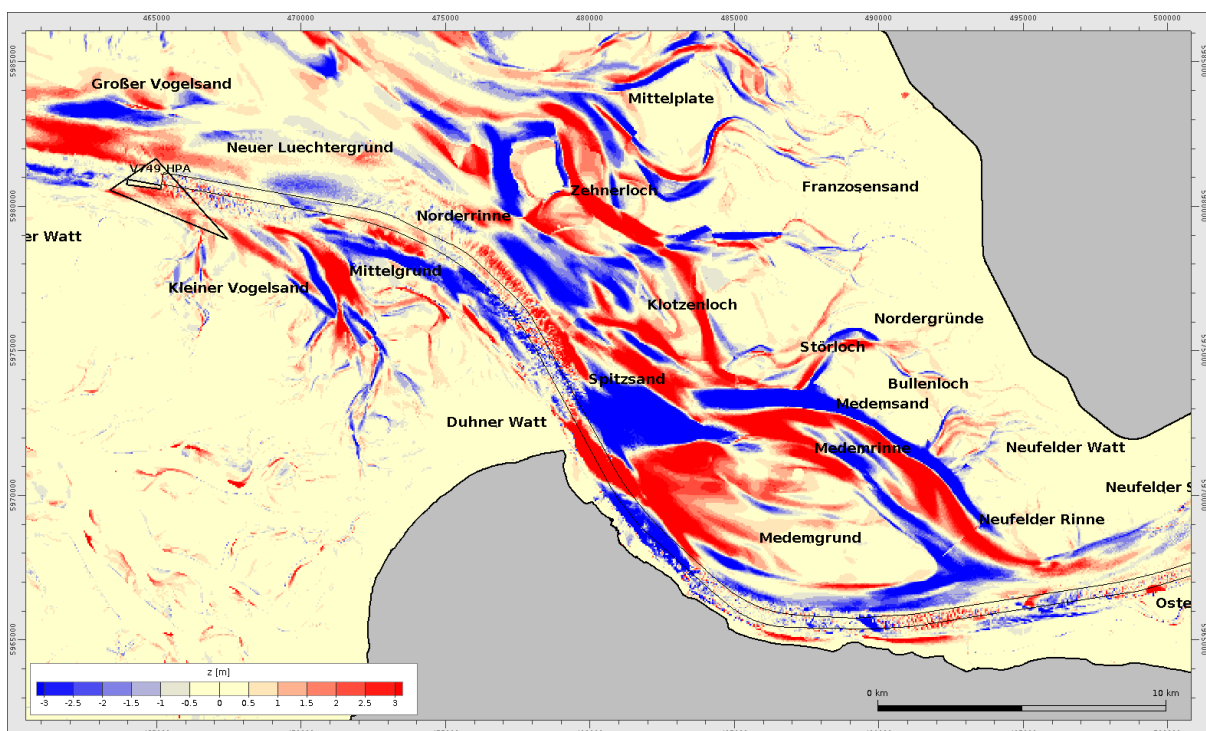


Bild 13: Differenzen zwischen den Jahrestopographien 2019 und 2012 (rot = Deposition, blau = Erosion)

4.3 Beschreibung der VS „Hamburger Außenelbe“ und Vergleich mit dem VSB 730/740

Die Lage der VS „Hamburger Außenelbe“ bei Elbe-km 749 sowie die beiden VS 738_4 und 738_5 aus dem VSB 730/740, welche im Gutachten BAW (2021) beschrieben sind, sind in Bild 14 in rot eingezeichnet, im Hintergrund ist die Modelltopographie sichtbar.

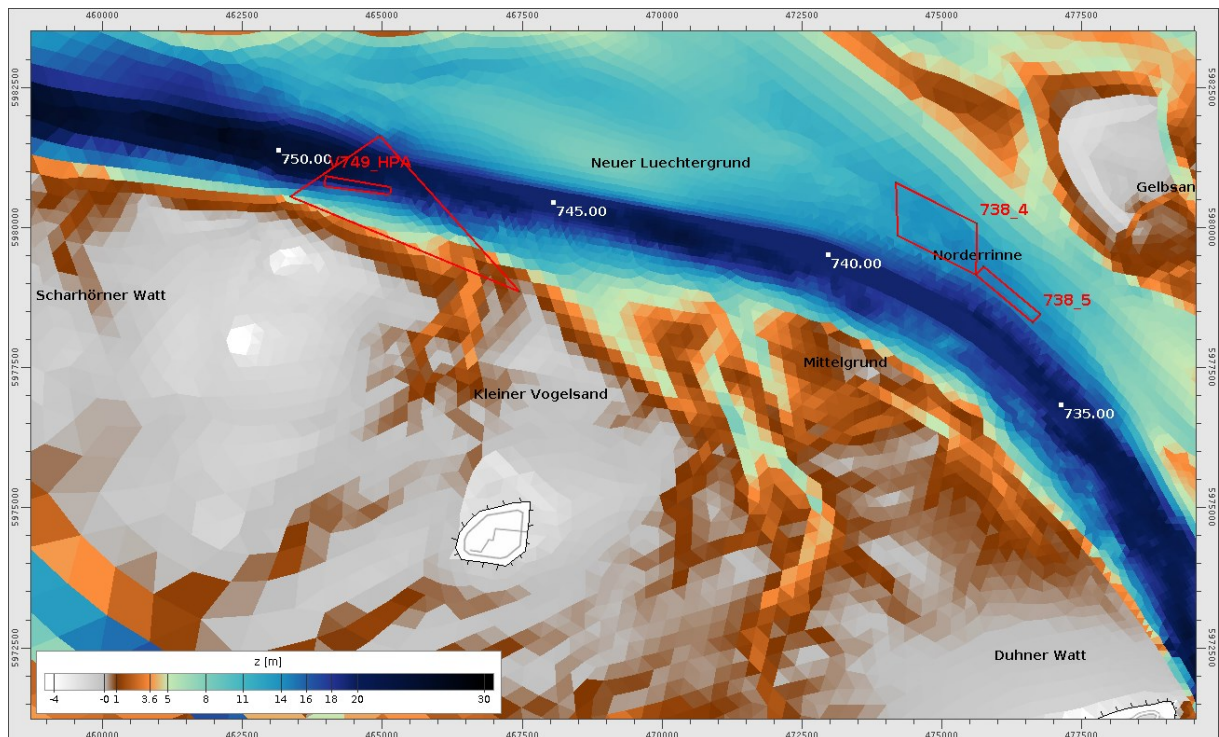


Bild 14: Lage der VS "Hamburger Außenelbe" und VSB 730/740 (in rot) vor der Modelltopographie

Aufgrund der gewählten Methode des Einbringens von Baggergut im Modell (siehe BAW (2021)) hat die Fläche auch Einfluss auf die Menge an Baggergut, welche im Modell berücksichtigt wird. Die jeweiligen Flächen und entsprechenden Baggergut-Mengen der VS 749 sowie VS 738_4 und 738_5 sind in Tabelle 3 zusammengefasst, die Umrechnung zwischen der Baggergutmenge in t TS und dem Laderaumvolumen in m³ ist von verschiedenen Parametern abhängig, welche in Kapitel 3.5 erläutert sind.

Tabelle 3: Vergleich der Flächen und Baggergut-Mengen für die Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ mit den Verbringstellen 738_4 und 738_5

	VS 738_4	VS 738_5	VS 749
Fläche im Modell	1.330.000 m ²	262.000 m ²	190.000 m ²
Baggergut-Menge t TS	836.560 t	170.000 t	124.660 t
Laderaum-Volumen	2.370.000 m ³	482.000 m ³	360.000 m ³

Es ist in Bild 14 und Tabelle 3 erkennbar, dass die VS 749 kleiner ist, als die in BAW (2021) berücksichtigten Verbringstellen. Bei der Dimensionierung der Verbringstelle wurden der Abstand zur Fahrrinne, die Wassertiefe (vgl. Bild 15) sowie der Abstand zu Naturschutzgebieten berücksichtigt. Im Vergleich zu den für die Umlagerung von Feinsedimenten geeigneten VS des VSB 730/740 liegt die VS 749 etwas weiter stromab, südlich statt nördlich von der Fahrrinne sowie näher am Fahrwasser.

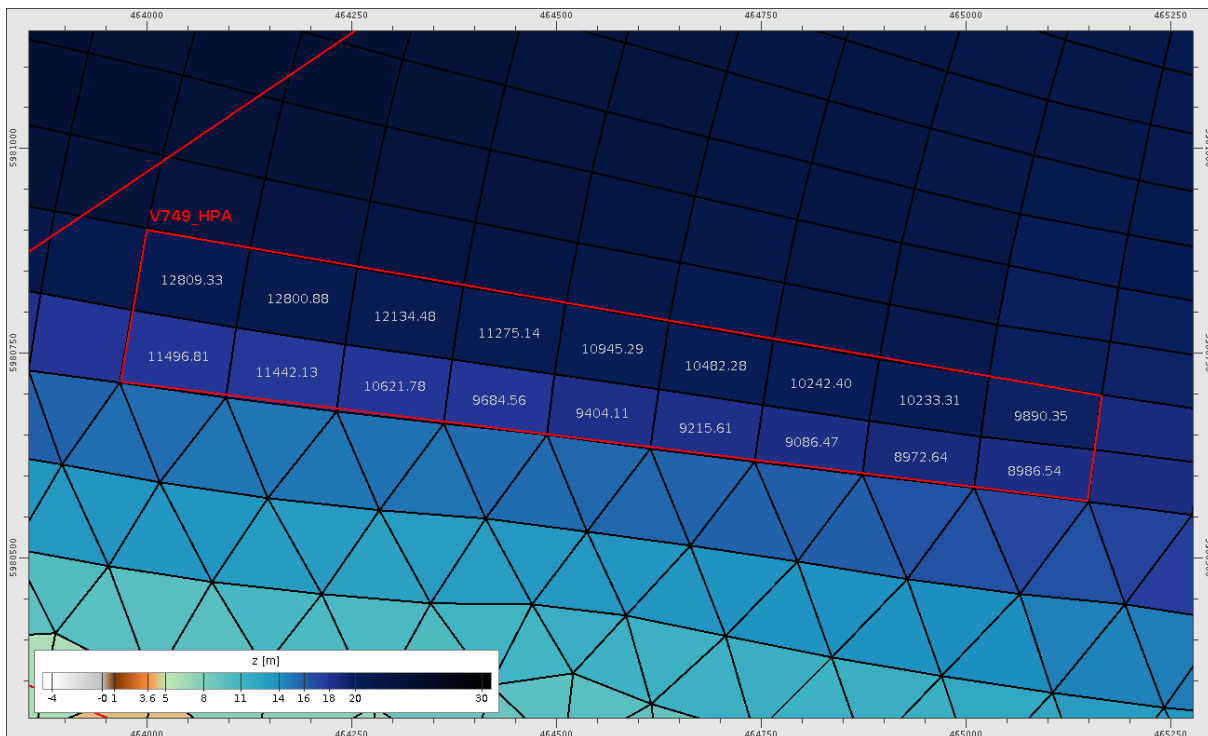


Bild 15: Elemente der VS 749 (rot umrandet) und die jeweiligen Flächeninhalte (in weiß) und Elemente sowie Wassertiefen im Modell (schwarze Linien bzw. Hintergrundfarbe)

5 Systemstudien

Um die Einflüsse verschiedener Randbedingungen sowie des methodischen Vorgehens auf die Verteilung des Baggergutes beurteilen zu können, wurden Systemstudien unter vereinfachten Bedingungen (kürzere Simulationszeit, kein Seegang, konstanter Oberwasserzufluss) durchgeführt. Damit stellen sie einen Baustein in der Kette von aufeinander aufbauenden Untersuchungen dar und dienen der Interpretation und Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Kapitel 6.

5.1 Simulation der Umlagerung von Baggergut

Im Moment der Umlagerung von Baggergut mit einem Hopperbagger an der Verbringstelle fällt ein hochkonzentriertes Sediment-Wassergemisch mit hoher vertikaler Geschwindigkeit durch die Wassersäule und breitet sich nach dem Auftreffen auf den Boden größtenteils horizontal aus. Das heißt, dass ein großer Teil des Baggergutes zunächst auf den Boden absinkt, während ein geringer Teil in der Wassersäule verbleibt und sofort zur Verdriftung zur Verfügung steht. In der Literatur wird der Anteil an Sediment, welches in der Wassersäule verbleibt, mit Werten zwischen 1 und 15 % quantifiziert (Truitt 1988; Lai et al. 2018). Eine verbesserte Abschätzung des Verklappungsvorganges und wie dieser sich in hydrodynamischen Modellen abbilden lässt, wird aktuell in Forschungsprojekten² bearbeitet.

Der oben skizzierte Vorgang zeigt sich auch bei Messungen, die bei Baggergutumlagerungen mit Elbsedimenten gemacht wurden. Erstmals wurden solche Messungen in den 90er Jahren bei Wittenbergen im Bereich Hamburg durchgeführt (Witte 1996). Auch die Umlagerungen von HPA bei der Tonne E3 in der Nordsee wurden zweimal messtechnisch begleitet (HR Wallingford 2017). Diese Art Messungen sind jedoch nicht allein als Entscheidungshilfe geeignet, wie der Vorgang des Einbringens von Baggergut in einem numerischen Modell berücksichtigt werden sollte, da sie kaum belastbare quantitative Daten liefern. Zudem sind die hydrologischen und morphologischen Verhältnisse im Bereich der VS „Hamburger Außenelbe“ weder mit denen bei Wittenbergen noch bei der Tonne E3 vergleichbar.

Die Umlagerung von Baggergut kann derzeit nicht präzise simuliert werden. Für die vorliegenden Untersuchungen stehen zwei verschiedene Methoden der Einbringung von Baggergut im Modell zur Verfügung, welche eine Bandbreite abbilden. Für die erste Studie werden mehrere Umlagerungsvorgänge modelliert. Es wird alle 5 Stunden über einen Zeitraum von 15 Minuten, nacheinander in 15 Zellen des Berechnungsnetzes, die innerhalb der Verbringstelle liegen (vgl. Bild 15), ein hochkonzentriertes Wasser-Sediment-Gemisch über die gesamte Wassersäule eingeleitet. Mit den Annahmen aus Kapitel 3.5 ergibt sich eine Menge von 3180 t TS pro Baggerladung zu je 9.000 m³ Laderaumvolumen, wodurch sich mit 40 Umläufen die Gesamtmasse für die VS 749 von ca. 124.660 t TS (aufgerundet auf 40 Umlagerungsvorgänge) ergibt.

² z.B. im Projekt „PROVER“: <https://www.lufi.uni-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/forschungsprojekte-detailansicht/projects/prover-prozessverstaendnis-von-verklappungsvorgaengen-von-feinsediment-in-tidebeeinflussten-gewaessern/>

In dem Wasservolumen, das durch die Berechnungszelle repräsentiert wird, ergeben sich kurzfristig recht hohe Schwebstoffkonzentrationen, jedoch sind diese nicht so groß (tiefengemittelt werden 2 kg/m^3 nicht überschritten), dass die Validität des Modells verletzt wäre. Die unmittelbare Verdriftung während der Umlagerung ist somit im Modell größer als in der Natur. Dadurch sind die relevanten Aussagen in Bezug auf die unmittelbar auftretenden Schwebstoffgehalte für diese Auswirkungsprognose auf der sicheren Seite.

Für die zweite Studie wird das Baggergut am Boden abgelegt. Dafür wird die Sedimentmasse auf dem Boden des Modellgitters verteilt. Hier wird der obere Bereich des Bodenmodells mit dem Modellbaggergut gefüllt. Diese eingebrachten Sedimente sind markiert (analog zu den in die Wassersäule eingeleiteten Sedimenten), sodass sie sich später von den Hintergrundsedimenten unterscheiden lassen. Das auf diese Weise eingebrachte Baggergut verdriftet mit der Zeit von der Verbringstelle.

Bei einer Einleitung über die Wassersäule verdriftet das gesamte Material zwar sehr schnell, aber dafür über mehrere Umlagerungsvorgänge. Beim Ablegen auf dem Boden muss das Material zunächst von der Strömung erodiert werden, ist jedoch von Beginn an komplett verfügbar. Daher stellen diese beiden Simulationen zwei Extrema im Hinblick auf die durch das umgelagerte Baggergut erzeugten zusätzlichen Schwebstoffgehalte dar. Eine Sortierung der Fraktionen, welche bei der Baggergutumlagerung in der Realität beobachtet wurde (Truitt 1988), kann bei beiden Simulationsarten im Modell festgestellt werden.

In BAW (2021) wurden diese beiden Methoden simuliert und verglichen. Die Unterschiede in der großräumigen und langfristigen Verteilung der Sedimentmassen und Schwebstoffgehalte zwischen den beiden Varianten sind gering. In räumlicher und zeitlicher Nähe zur Umlagerung entstehen beim Einbringen des Baggergutes in die Wassersäule deutlich höhere Schwebstoffgehalte, als wenn das Baggergut auf der Sohle abgelegt wird, sodass die so errechneten Schwebstoffgehalte als Überschätzung der Realität angesehen werden können. Daher wird diese Variante primär zur Ermittlung der Auswirkungen der Umlagerung von Baggergut auf den Schwebstoffgehalt ausgewertet. Die Erosion des zunächst abgelagerten Baggergutes von der Sohle wird durch die zweite Variante dargestellt und erzeugt im späteren Verlauf der Simulation sowie in weiter entfernten BZR höhere Schwebstoffgehalte als sie durch Einleitung in die Wassersäule in diesen BZR entstehen. Die tatsächliche Auswirkung der Verbringung auf den Schwebstoffgehalt liegt zwischen diesen beiden Varianten, sodass diese eine Bandbreite beschreiben.

Die am Beispiel des VSB 730/740 durchgeführte Systemstudie zu den Auswirkungen der Methode des Einbringens von Baggergut im Modell wird für die VS 749 nicht im Detail wiederholt, da die zuvor beschriebenen prinzipiellen Wirkmechanismen nicht von der Stelle des Einbringens abhängig sind und durch die ähnlichen hydrodynamischen Bedingungen angenommen werden kann, dass die in BAW (2021) ermittelten und im vorigen Absatz zusammengefassten Ergebnisse auch für die VS 749 gültig sind.

5.2 Einfluss des Oberwasserzuflusses

Der Einfluss des Oberwasserzuflusses wurde für die Verbringstelle 749 untersucht, indem über zwei Monate Simulationszeit, ohne Berücksichtigung von Seegang, ein konstanter Oberwasserzufluss von 180, 360, 720 bzw. 1080 m³/s am Wehr Geesthacht eingesteuert wird. Dies deckt eine realistische Bandbreite ab, insbesondere in Anbetracht der Entwicklung von niedrigen Oberwasserzuflüssen seit 2013 (vgl. Kapitel 3.3.2).

Die Unterschiede im Schwebstoffgehalt in der Außenelbe zwischen den Läufen mit $Q = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q = 1080 \text{ m}^3/\text{s}$ bewegen sich für die hier betrachteten Baggergutmengen in der Größenordnung zwischen 0,5 – 5 g/m³. Die absoluten Schwebstoffgehalte des Baggergutes liegen in dem Gebiet um den Faktor 2-4 und die des Hintergrundsediments um den Faktor 20-40 höher.

Auf die Verteilung der Sedimentmassen am Boden hat der Oberwasserzufluss nur geringe Auswirkungen, die Differenzen liegen bei wenigen Millimetern Auflage in den am stärksten beaufschlagten Bereichen und sind vor dem Hintergrund der starken Morphodynamik gering.

In der Außenelbe treten aufgrund von morphodynamischen und baroklinen Effekten komplexe Strömungsmuster auf, welche die Transportwege stromab von Brunsbüttel bestimmen. Stromauf von Brunsbüttel bewirkt ein höherer Oberwasserzufluss die Verlagerung der Trübungszone in Richtung Mündung während bei einem niedrigeren Oberwasserzufluss die Trübungszone weiter stromauf liegt. Weiter draußen, im Mündungstrichter der Elbe, wird das Tideprisma, also das Wasservolumen, welches mit jeder Tide ein- und ausströmt, so groß, dass der Einfluss des Oberwasserzuflusses stark abnimmt. Auf Baggergut, welches bei der VS 749 umgelagert wird, hat der Oberwasserzufluss zunächst also nur einen geringen Einfluss. Sobald dieses Material jedoch durch die Tideströmung stromauf in den Mündungstrichter und in den Bereich der Trübungszone transportiert wurde, wird dieser Einfluss größer. Trotz des geringen Einflusses im Bereich der Außenelbe ist der Oberwasserzufluss für das Sedimentmanagement in der Tideelbe also nach wie vor bedeutend. Die Wirkung tritt jedoch nicht bereits bei der Umlagerung auf, sondern erst nach einigen Wochen oder Monaten und auch nur in Bezug auf die geringen Anteile des Baggergutes, welche bereits in die Elbe hinein transportiert wurden.

5.3 Einfluss des Seegangs und von Sturmfluten

Bezüglich der prinzipiellen Wirkung von Seegang und Sturmfluten wird auf die Untersuchungen in BAW (2021) für den VSB 730/740 verwiesen. Da diese Effekte erst wirksam werden, wenn sich das Baggergut bereits verteilt hat, können die dort beschriebenen Erkenntnisse auf die VS „Hamburger Außenelbe“ übertragen werden, wie im Folgenden beschrieben ist.

Das Sediment wird durch die Berücksichtigung von Seegang in der Modellierung großräumiger verteilt. Durch die größeren Sohlschubspannungen kann das Material insbesondere auf den höher gelegenen Wattflächen wieder mobilisiert und damit weiter transportiert werden. So kann sich auch gröberes Material auf den Wattflächen ablagern. Der Seegang verstärkt insbesondere den

Transport der Fraktion „Very_Fine_Sand“ sowie den Transport über den Seerand, aus dem Gebiet hinaus.

Die simulierte Sturmflut führt prinzipiell durch die höheren Wasserstände und größeren Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere auf den höher gelegenen Flächen, zu einer Mobilisierung und einem Transport von Sedimenten. Außerdem findet durch die Sturmflut, in Kombination mit den niedrigen Oberwasserzuflüssen im Dezember 2016, ein verstärkter Transport in das Ästuar hinein statt. Das Baggergut verhält sich dabei analog zu den Hintergrundsedimenten mit gleichen Eigenschaften (Sinkgeschwindigkeiten), da Erosion und Sedimentation nur von den physikalischen Eigenschaften abhängig sind und nicht von der Herkunft.

Diese Mechanismen sind charakteristisch und treten regelmäßig in der Sturmflutsaison auf. Daher werden die Ergebnisse in Kapitel 6, insbesondere der Sedimentmassen am Boden, nach Ende dieses Sturmflutereignisses betrachtet.

5.4 Skalierbarkeit der Ergebnisse

Eine Systemstudie zur Skalierbarkeit der Ergebnisse auf andere Mengen oder Anteile von verschiedenen Sedimentfraktionen wurde in BAW (2021) für den VSB 730/740 durchgeführt. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sind wie im Folgenden beschrieben auf die VS „Hamburger Außenelbe“ übertragbar.

Sowohl die Schwebstoffgehalte als auch die Sedimentmassen am Boden führen bei der untersuchten Skalierung mit dem Faktor 4 zu vergleichbaren Ergebnissen, sowohl in Bezug auf die Größenordnung, als auch auf die räumliche Verteilung. Dies bedeutet, dass die Modellergebnisse in der untersuchten Größenordnung skalierbar sind, um sie für verschiedene Mengenszenarien verwenden zu können. Die entscheidende Einflussgröße ist der Schwebstoffgehalt, da dieser nicht-lineare Wechselwirkungen bewirkt. Diese sind bei den hier auftretenden Schwebstoffgehalten gering, weswegen die Ergebnisse in o.g. Maßen skalierbar sind. Je stärker sich jedoch eine nicht-lineare Wechselwirkung auf die Modellergebnisse auswirkt, umso weniger ist ein Ergebnis extrapolierbar. Szenarien, die voraussichtlich zu deutlich höheren Schwebstoffgehalten führen würden, müssen explizit modelliert werden. Dies wäre z.B. der Fall, wenn bei gleicher Umlagerungspraxis Szenarien mit intensiverer Einbringung von Baggergut untersucht werden sollen. Sofern die Intensität der Einbringung, also die Menge des innerhalb von wenigen Umlagerungsvorgängen eingebrachten Baggergutes, nicht erhöht wird, ist auch nicht von deutlich höheren maximalen Schwebstoffgehalten auszugehen, sodass nicht-lineare Wechselwirkungen nicht zu erwarten sind.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die morphologischen Ergebnisse aus den Läufen V749_HPA_Qvar_SG und V749_HPA_Q360_40Uml, auf welchen die weitergehenden Auswertungen für die Erstellung einer Auswirkungsprognose basieren, zusammengefasst. Die Eigenschaften der einzelnen Modellläufe sind unten stichpunktartig beschrieben. In Bezug auf die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte sind aufgrund der Umlagerung keine messbaren Auswirkungen zu erwarten.

Hier handelt es sich ausschließlich um eine Auswertung der großräumigen, prinzipiellen Transportwege von feinkörnigem Baggergut, welches in der VS „Hamburger Außenelbe“ eingebracht wird. Es werden die modellierten Mengen und Zeiträume betrachtet. Absolute Angaben von z.B. Schwebstoffgehalten oder Sedimentablagerungen beziehen sich daher hier immer auf die modellierten Szenarien und stellen keine Prognosen aufgrund tatsächlich geplanter Umlagerungsszenarien dar. Für die Ergebnisse der Untersuchung von verbringungsbedingten Auswirkungen auf die Umwelt wird auf HPA (2021) verwiesen, da hierfür weitergehende Analysen notwendig sind. Die hier vorgestellten Ergebnisse stellen die ersten Schritte der in Kapitel 2 beschriebenen Kette von Untersuchungen dar.

Für die Auswertungen werden Ergebnisse aus zwei verschiedenen Simulationsläufen verwendet, welche im Folgenden noch einmal kurz beschrieben sind. Die Simulationsläufe unterscheiden sich nur durch die hier aufgeführten Modellparameter. Alle anderen Parameter sind identisch und in Kapitel 3 beschrieben.

Simulationslauf V749_HPA_Qvar_SG:

- Ablegen von Modellbaggergut auf der Sohle
- im Bereich der Verbringstelle 749, Menge: ca. 124.660 t TS
- Simulationszeit: 9 Monate
- mit variablem Oberwasserzufluss aus 2016
- Seegang ist im Modell berücksichtigt

Simulationslauf V749_HPA_Q360_40Uml:

- Einbringen des Modellbaggergutes über die gesamte Wassersäule in 40 Umläufen
- im Bereich der Verbringstelle 749, Menge: ca. 124.660 t TS
- Simulationszeit: 2 Monate
- mit konstantem Oberwasserzufluss von 360 m³/s
- Seegang ist im Modell nicht berücksichtigt

In den Systemstudien in Kapitel 5 sowie in BAW (2021) sind die Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Sedimentations- und Erosionsdynamik von Hintergrund- und Baggergutsedimenten beschrieben. Für die Verteilung der Sedimentmasse am Boden ist die Betrachtung einer längeren Simulationszeit von 9 Monaten sinnvoll. Bei der Betrachtung der Schwebstoffgehalte stellt das Einbringen in die Wassersäule im Vergleich zum Ablegen auf der Sohle, insbesondere für kurzfristige

und lokale Auswirkungen, eine Überschätzung der Schwebstoffgehalte dar. Dieses Szenario wird daher hauptsächlich für die Betrachtung der Schwebstoffe ausgewertet.

6.1 Schwebstoffgehalt

Für die Beurteilung der Ergebnisse in Bezug auf den Schwebstoffgehalt wird primär der Lauf V749_HPA_Q360_40Uml betrachtet, da das Einbringen des Sediments in die Wassersäule eine Überschätzung für die kurzfristigen und lokalen Schwebstoffgehalte darstellt. Die Maxima im Schwebstoffgehalt beim Einbringen des Baggergutes in die Wassersäule treten kurz nach dem Einbringen auf, wobei der zeitliche Abstand vom Verbringvorgang abhängig von der räumlichen Entfernung von der Verbringstelle ist. Zur Beurteilung der längerfristigen Auswirkungen und großräumigen Verbreitung wird zusätzlich der Lauf V749_HPA_Qvar_SG mit 9 Monaten Simulationszeit vergleichend herangezogen. Hier wird Seegang berücksichtigt, sodass eine stärkere Aufwirbelung von bereits sedimentiertem Baggergut stattfinden kann. Hier treten jedoch keine höheren Maxima auf als beim Einbringen in der Wassersäule. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurde, liegt die tatsächliche Auswirkung der Verbringung auf den Schwebstoffgehalt zwischen diesen beiden Varianten, sodass diese eine Bandbreite beschreiben.

Die Menge an Baggergut, welches an der Verbringstelle 749 zu Beginn der Simulationszeit ins Modell eingebracht wird, stellt für das Szenario mit 40 Umlagerungen eine realistische Annahme dar. Das Baggergut wird innerhalb von 8 Tagen in die Wassersäule eingebracht, mit jeweils 9.000 m³ Laderaumvolumen alle 5 Stunden. Die maximalen Schwebstoffgehalte im Nahbereich treten innerhalb dieser Zeit oder sehr kurz danach auf.

Bei der Betrachtung der Summe aller Baggergut-Fraktionen ist stets zu berücksichtigen, dass insbesondere die gröberen Fraktionen „Coarse Silt“ und „Very Fine Sand“ kaum oder gar nicht zur Trübung des Wasserkörpers beitragen. Dennoch werden Sie im Modell als Schwebstoff oder intermittierend transportiert und hier mitberücksichtigt. Dies ist ausführlicher in Kapitel 3.6.2 beschrieben.

In Bild 16 sind die maximalen Schwebstoffgehalte jeder Tide (Mittelwert über alle analysierten Tiden) im Spring-Nipp-Zyklus snz07 bis snz10 aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml für die Summe der Baggergut-Fraktionen dargestellt. Bei dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Schwebstoffgehalte aufgrund der Baggergutumlagerung, über zwei Wochen gemittelt, nur im unmittelbaren Nahfeld der Verbringstelle 0,05 kg/m³ übersteigt. Da hier die letzten Umlagerungsvorgänge und die Wochen danach enthalten sind, ist davon auszugehen, dass die Werte einen guten Eindruck von den hohen auftretenden Schwebstoffgehalten vermitteln. Insbesondere bei Betrachtung der nicht unmittelbar an die Verbringstelle angrenzenden Gebiete treten die Maxima nicht zeitgleich mit der Umlagerung, sondern abhängig vom Transportweg etwas später auf. Bei der Darstellung der maximalen Schwebstoffgehalte für die Summe der Baggergut-Fraktionen ist zu berücksichtigen, dass dies eine Überschätzung darstellt, da nicht davon auszugehen ist, dass die Maxima für die einzelnen Fraktionen im gesamten betrachteten Gebiet exakt zeitgleich auftreten (vgl. Kapitel 3.6.3).

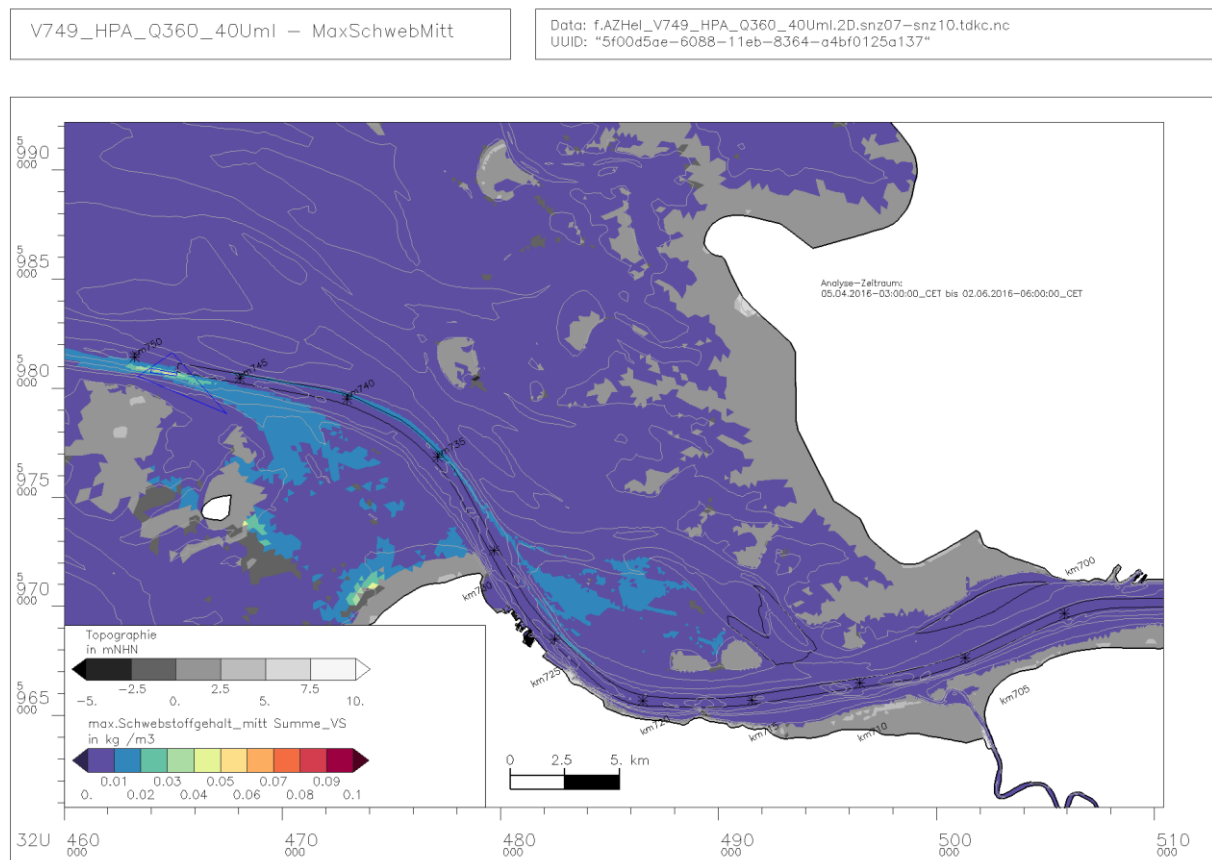


Bild 16: Maximaler Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Frak-tionen in der Außenelbe im Zeitraum snz07-snz10 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

Eine detailliertere Betrachtung erfolgt anhand der nachfolgenden Darstellungen der Transport-wege für einzelne Fraktionen sowie der Zeitreihendarstellung, exemplarisch für zwei Bilanz-räume. Jedes Sediment-Teilchen, welches später an einer Stelle sedimentiert oder über den See-rand aus dem Modell herausgetragen wird (vgl. auch Kapitel 6.3), wird aufgrund der vor Ort herr-schenden Strömung transportiert. Dies gilt auch für das Baggergut. Anhand der advektiv trans-portierten Rest-Sedimentmenge kann ermittelt werden, welche Transportrichtung für verschie-dene Fraktionen unter den betrachteten Randbedingungen nach Ablauf einer Tide im Mittel do-miniert. Dieser Parameter ist auch vom Oberwasserzufluss abhängig (vgl. Kapitel 5.2).

Die advektiv transportierte Rest-Sedimentmenge der vier Baggergut-Frak-tionen aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml ist in Bild 17 dargestellt. Da das Baggergut ausschließlich im Bereich der Verbringstelle ins Modell eingeleitet wird, kann es auch nur von dort aus transportiert werden. Es ist in der Darstellung erkennbar, dass die feineren Fraktionen residuell auch stromab, in Rich-tung Seerand, transportiert werden, während z.B. „Very Fine Sand VS“ hauptsächlich stromauf in den Mündungsbereich gelangt. Außerdem tritt eine Aufteilung der Strömung auf die Medemrinne und die Fahrrinne auf, wobei feine Fraktionen, welche in den Mündungstrichter eingetragen wer-den, durch die Medemrinne mit der Flutströmung stromauf und in der Fahrrinne mit der Eb-beströmung wieder stromab transportiert werden.

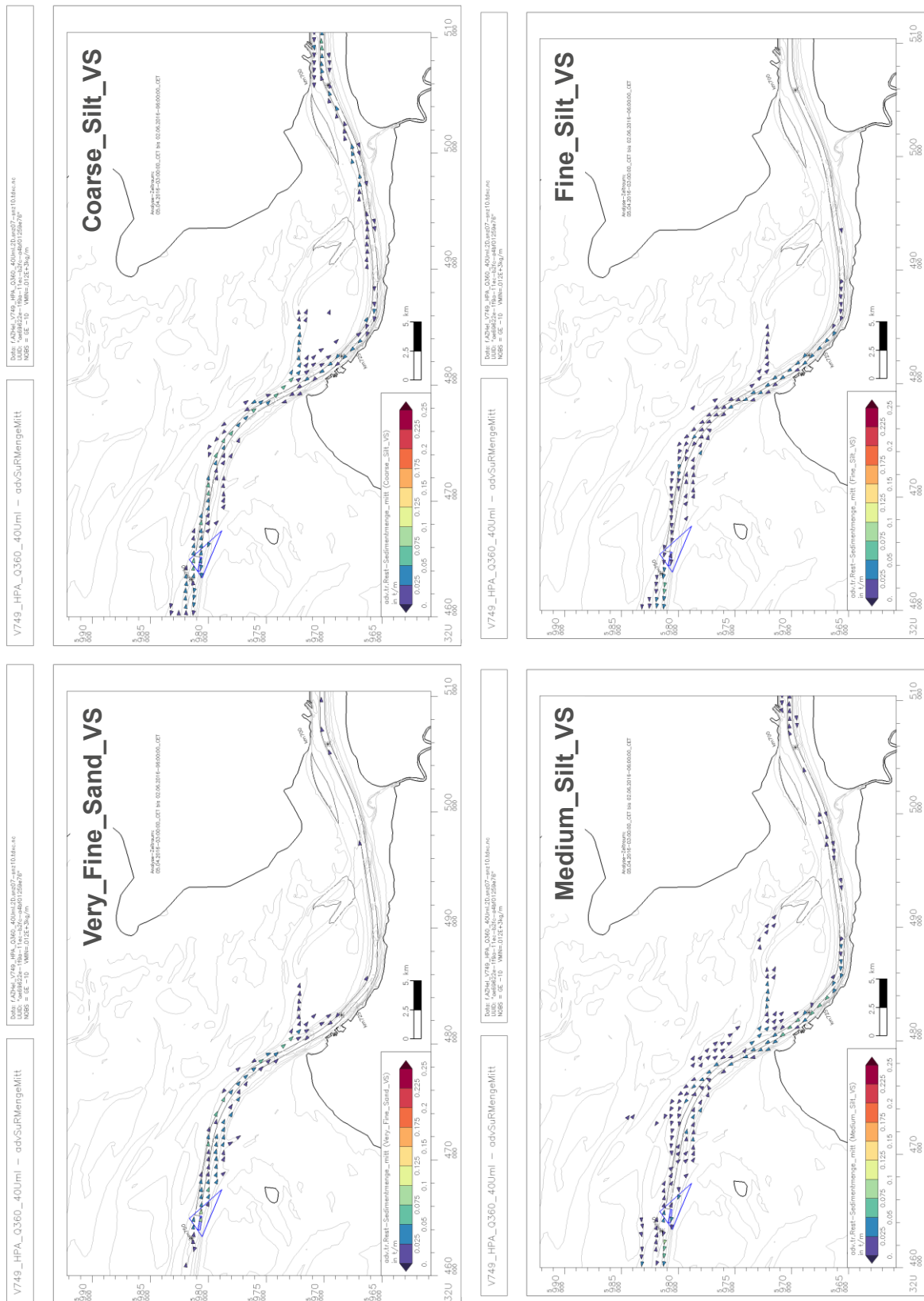


Bild 17: Advektiv transportierte Rest-Sedimentmenge (Mittelwert) der einzelnen Baggergut-Fraktionen in der Außenelbe aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

Es werden exemplarisch für die zwei Bilanzräume „25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO“ und „51_Nahbereich_VS749_HPA“ Zeitreihen für die einzelnen Baggergut-Fraktionen (Bild 18 und Bild 19) sowie die Summe der Baggergut-Fraktionen als Anteil am Gesamt-Schwebstoff (Bild 20 und Bild 21) gezeigt. Es ist in allen Zeitreihen der Mittelwert des Schwebstoffgehaltes innerhalb der Bilanzräume für die einzelnen Fraktionen enthalten.

Bei Betrachtung der einzelnen Baggergut-Fraktionen ist erkennbar, dass im Nahbereich der VS (Bild 18) die Maxima für alle Fraktionen in unmittelbarer zeitlicher Nähe zum Umlagerungsvorgang auftreten und dieselbe Größenordnung haben. Nach Ende der Umlagerungen fällt der Schwebstoffgehalt der gröberen Fraktionen sehr viel schneller ab als der der feineren Fraktionen. „Fine Silt VS“, dargestellt durch die graue Linie, ist am größten und „Very Fine Sand VS“ (blaue Linie) ist schnell nicht mehr erkennbar. Dieser Effekt ist auch in weiter entfernten Bilanzräumen, wie z.B. „25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO“ (Bild 19) erkennbar, hier bleiben die Schwebstoffgehalte aus den Baggergut-Fraktionen jedoch geringer als im Nahbereich.

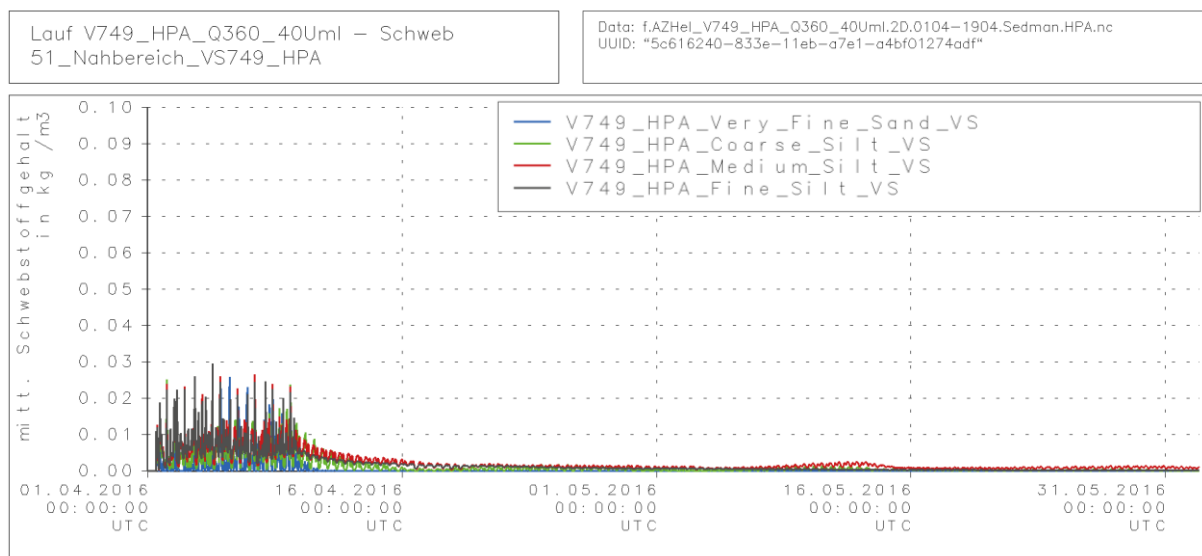


Bild 18: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes für alle Baggergut-Fraktionen über die Zeit für Bilanzraum "51_Nahbereich_VS749_HPA" aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

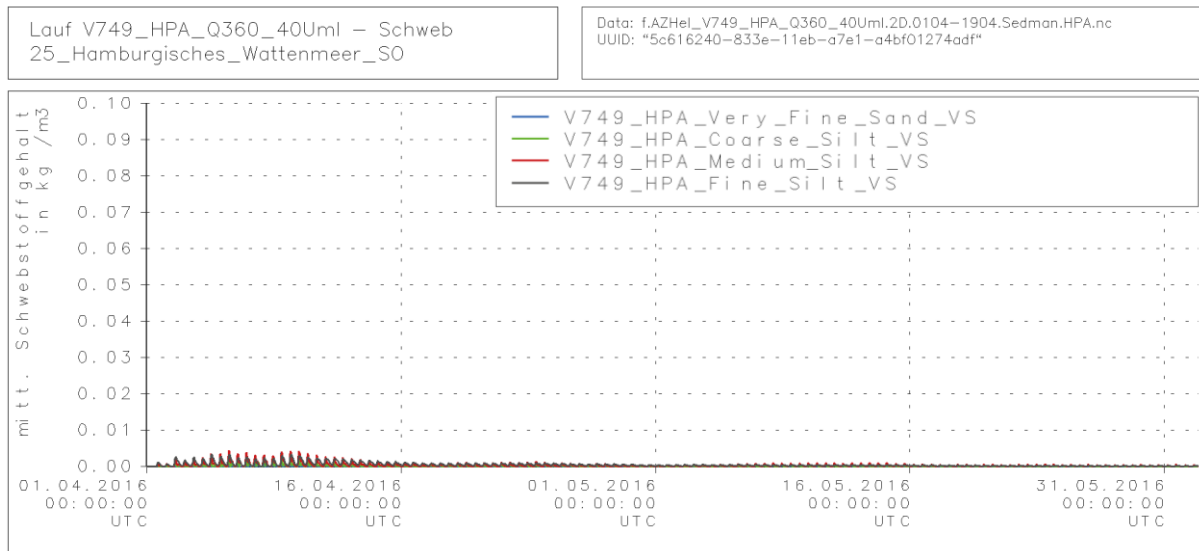


Bild 19: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes für alle Baggergut-Fractionen über die Zeit für Bilanzraum "25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO" aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

In den folgenden Abbildungen ist in Grün jeweils der Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe aller Baggergut-Fractionen und in Grau der Anteil am Gesamt-Schwebstoffgehalt (die Summe aller Fractionen enthält das Baggergut und das Hintergrundsediment) über die Simulationszeit für die jeweiligen BZR aufgetragen.

Im Nahbereich (Bild 20) treten hohe Schwebstoffgehalte sofort ab Beginn und ausschließlich während der Umlagerung von Baggergut auf, welche deutlich erkennbar sind. Im Anschluss fallen die Schwebstoffgehalte schnell ab und der Anteil am Gesamt-Schwebstoff liegt etwa zwei Wochen nach Ende der Umlagerung unter 10 % (bezogen auf die Baggergutmenge von 124.660 t TS innerhalb von 8 Tagen). Das zwischenzeitliche Abfallen des Anteils von Baggergut am Gesamt-Schwebstoff innerhalb der Umlagerungsphase ist auf das Einsetzen der Springtide zurück zu führen (vgl. Bild 2). In weiter entfernten Bilanzräumen, wie z.B. im Hamburgischen Wattenmeer (Bild 21) treten erhöhte Schwebstoffgehalte aufgrund des Baggergutes abhängig von der Entfernung zur Umlagerungsstelle erst später auf, in diesem Fall nach wenigen Tagen. Hier sind die einzelnen Umlagerungsvorgänge nicht mehr voneinander zu unterscheiden, es treten hauptsächlich durch die Tide beeinflusste Schwankungen auf. Auch hier liegt der Anteil am Gesamt-Schwebstoff etwa zwei Wochen nach Ende der Umlagerung unter 10 % (bezogen auf die Baggergutmenge von 124.660 t TS innerhalb von 8 Tagen).

In Bild 22 sind für denselben Simulationslauf V749_HPA_Q360_40Uml die Daten für alle Bilanzräume enthalten, weshalb kaum noch einzelne Linien voneinander unterschieden werden können. Die höheren Schwebstoffgehalte und Anteile treten ausschließlich in den Polygonen auf, welche direkt in oder in unmittelbarer Nähe zur Verbringstelle liegen, was auch an den deutlich erkennbaren Umlagerungsvorgängen sichtbar ist. Da bei einem Umlagerungsvorgang in der Natur andere physikalische Prozesse (z.B. Konsolidierung während der Fahrt, Sortierung während des

Absinkens, Ausbreitung am Boden) auftreten, die hier nicht berücksichtigt werden können, ist es nicht anzunehmen, dass diese Schwebstoffgehalte tatsächlich auftreten (vgl. Kapitel 5.1). Auch hier liegt etwa ab Mai, also einen Monat nach Beginn der Simulationszeit und 2-3 Wochen nach Ende der Umlagerung der Anteil am Gesamt-Schwebstoff in allen Bilanzräumen bei 10 % oder darunter (bezogen auf die Baggergutmenge von 124.660 t TS innerhalb von 8 Tagen). Einzelne Schwankungen sind auch darüber hinaus noch erkennbar, diese lassen sich auf Springzeiten zurückführen, welche auf höher gelegenen Wattflächen zu erhöhten Schwebstoffgehalten führen, da diese Gebiete nicht durch jede Tide überflutet werden.

Eine analoge Darstellung für den Lauf V749_HPA_Qvar_SG und somit über 9 statt nur 2 Monate zeigt Bild 23. Hier treten die höheren Schwebstoffgehalte und Anteile am Gesamt-Schwebstoff etwas später auf, da das Baggergut zunächst von der Gewässersohle erodiert werden muss. Dadurch ist das Baggergut später und über einen größeren Zeitraum verteilt im System verfügbar und der Zeitraum mit Anteilen > 10 % (bezogen auf die Baggergutmenge von 124.660 t TS) erstreckt sich über einen etwas längeren Zeitraum. Nach einem ersten Abklingen sind Schwankungen aufgrund der Spring-Nipp-Variabilität erkennbar. Außerdem gibt es vereinzelt höhere Schwebstoffgehalte, welche zeitlich mit dem Auftreten von Wind- und Sturmereignissen korrelieren. Dies ist besonders deutlich zur Zeit der Sturmflut vom 25. auf den 26. Dezember erkennbar. Hier steigt jedoch nur der Schwebstoffgehalt aufgrund des Baggergutes und nicht der Anteil am Gesamt-Schwebstoffgehalt, da der Hintergrund-Schwebstoffgehalt analog ansteigt. Am Ende der Simulationszeit liegt der Anteil von Baggergut am Gesamt-Schwebstoff auch hier in allen Bilanzräumen unter 10 % (bezogen auf die Baggergutmenge von 124.660 t TS). Das Baggergut hat sich somit in das Hintergrundsediment eingefügt und wird sich dementsprechend verhalten.

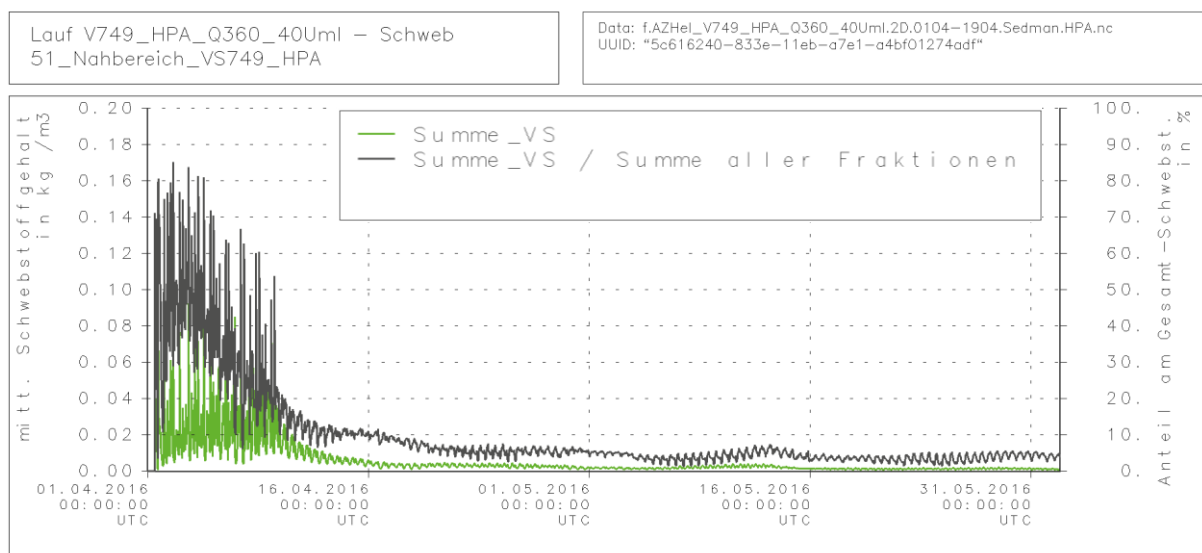


Bild 20: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fractionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für Bilanzraum "51_Nahbereich_VS749_HPA" aus dem Lauf V738_5_Q360_54Uml

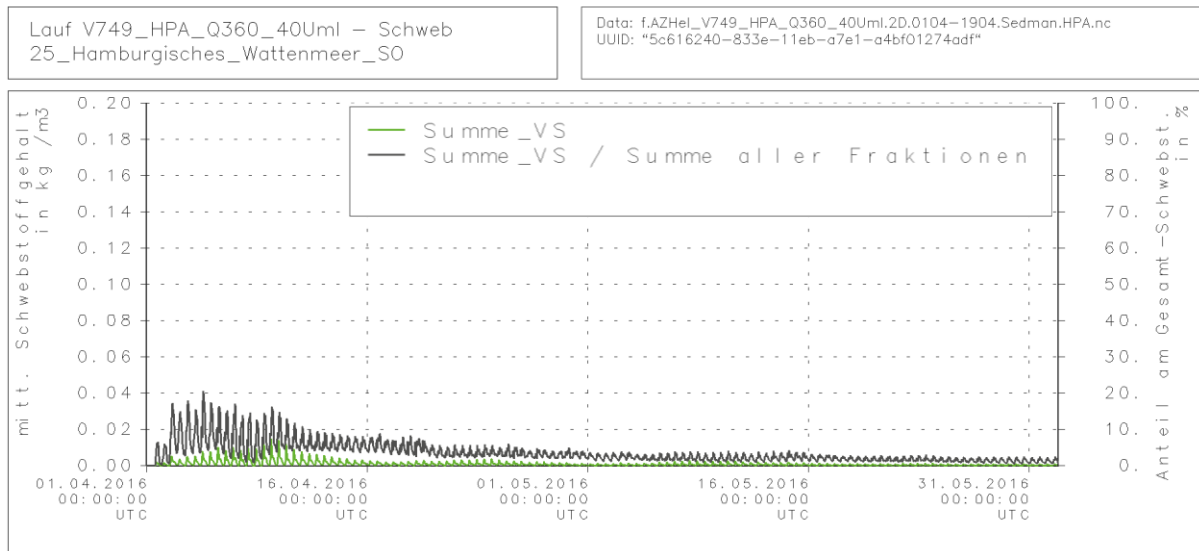


Bild 21: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für Bilanzraum "25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO" aus dem Lauf V738_5_Q360_54Uml

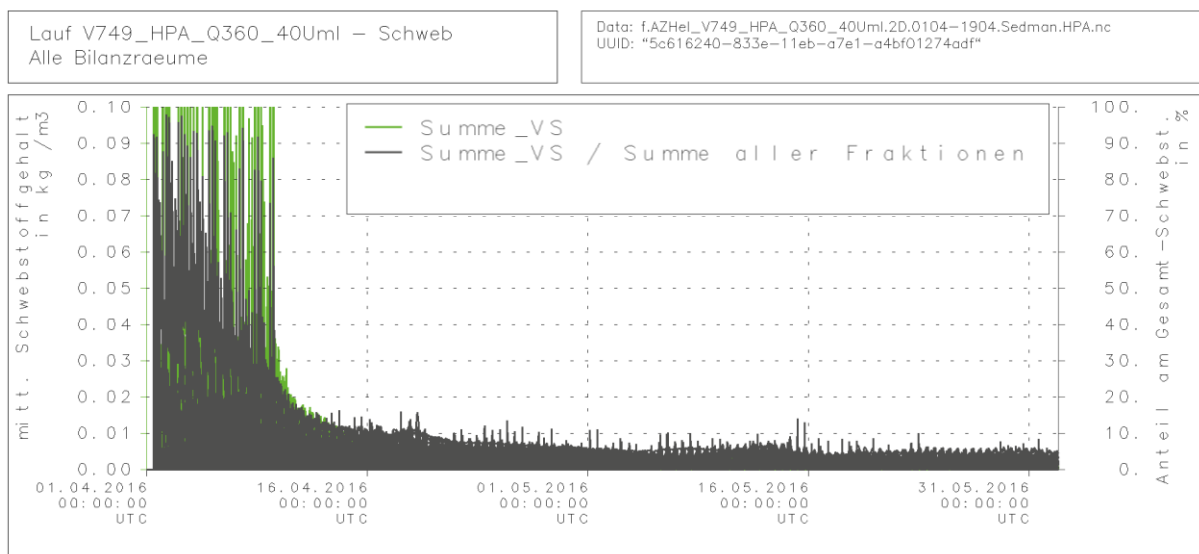


Bild 22: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Q360_40Uml (Linien liegen übereinander, es sind also nur die Maximal in allen Bilanzräumen auftretenden Werte sichtbar)

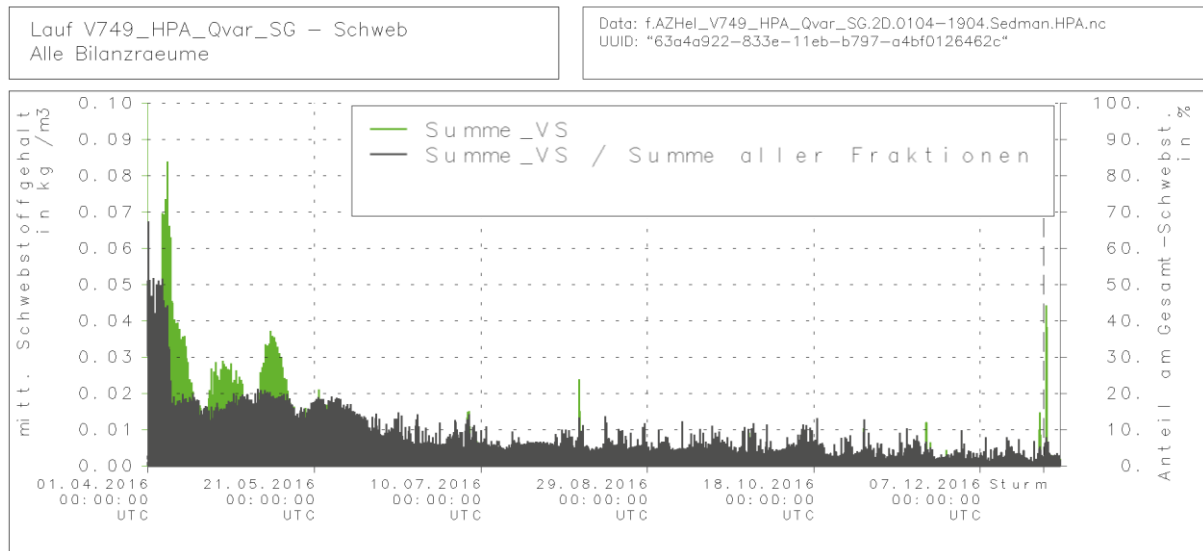


Bild 23: Mittelwert des Schwebstoffgehaltes als Summe der Baggergut-Fraktionen und Anteil am Gesamt-Schwebstoff über die Zeit für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG (Linien liegen übereinander, es sind also nur die Maximal in allen Bilanzräumen auftretenden Werte sichtbar)

Die wesentlichen Ergebnisse der Modelluntersuchungen in Bezug auf den Schwebstoffgehalt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ausbreitung des Baggergutes ist stark von der Sinkgeschwindigkeit der jeweiligen Fraktion abhängig.
- Es gibt räumliche Unterschiede. Im Nahbereich treten höhere Schwebstoffgehalte aufgrund des Baggergutes auf als in weiter entfernten BZR.
- Nach zwei Monaten Simulationszeit hat sich das Baggergut soweit verteilt, dass nur noch geringe Erhöhungen der Schwebstoffgehalte zu erwarten sind und sich das Baggergut in das Hintergrundgeschehen eingefügt hat.

6.2 Sedimentablagerung am Boden

Im Folgenden werden für die Auswertung der Sedimentmasse am Boden die Ergebnisse aus der Verbringstelle 749 betrachtet. Der betrachtete Simulationslauf trägt die Bezeichnung „V749_HPA_Qvar_SG“. Die Angaben absoluter Werte bezieht sich hier immer auf die in diesem Simulationslauf eingebrachte Menge an Baggergut von 124.660 t TS und stellt keine Prognose aufgrund tatsächlich geplanter Umlagerungsszenarien dar.

Bei der Betrachtung der Sedimentablagerung am Boden nach 9 Monaten ist stets zu berücksichtigen, dass ein Baggergut-Teilchen und ein beliebiges anderes Sedimentteilchen mit gleichen Eigenschaften (insbesondere Sinkgeschwindigkeit) denselben Strömungsverhältnissen ausgesetzt ist und sich somit auch vergleichbar „verhält“. Daher können auch die Baggergut-Fractionen am Ende der Simulationszeit in bekannten Sedimentationsschwerpunkten wiedergefunden werden. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um strömungsberuhigte Bereiche, wie z.B. Buhnenfelder, Hafenbecken und Buchten. Insbesondere in Bezug auf Hafenbecken können die hier getätigten Aussagen nur Anhaltspunkte für eine Entwicklung ohne Unterhaltung und Nutzungen geben und entsprechen nicht einer prognostizierten Entwicklung. Auch in Wattbereichen können Sedimente bei entsprechenden Stauwasserdauern und geringen Strömungsgeschwindigkeiten sedimentieren. Dies wird auch von Wachler (2021) beschrieben.

Bild 24 zeigt eine flächenhafte Darstellung der Sedimentablagerungen aufgrund der Baggergutverbringung bei der VS 749 nach 9 Monaten Simulationszeit im Bereich der Außenelbe. Wie bereits beschrieben, sind Schwerpunkte der Ablagerungen insbesondere in den strömungsberuhigten Gebieten, Seitenbereichen, Hafenbecken und Buchten erkennbar. Die errechneten Mächtigkeiten aufgrund der simulierten Baggergutmenge von 124.660 t TS betragen an den meisten Stellen weniger als 1 cm (Umrechnung von kg/m^2 in Mächtigkeiten siehe Kapitel 3.6.1), höhere Ablagerungsmächtigkeiten treten nur lokal und kleinräumig auf. In den meisten Gebieten liegt die Mächtigkeit des reinen Baggergutes unter 1 cm oder sogar unter 1 mm. Eine Mächtigkeit von 10 cm wird an keiner Stelle überschritten.

Im Anschluss wird die Sedimentmasse bezogen auf die in Kapitel 3.6.3 beschriebenen Bilanzräume betrachtet. Bei den Darstellungen über die Zeit in den folgenden Abbildungen sind alle Bilanzräume enthalten. Die Legende enthält der Übersichtlichkeit halber nur diejenigen Bilanzräume, welche in der Abbildung deutlich erkennbar sind und folglich mit nennenswerten Sedimentmassen beaufschlagt werden. Alle anderen Linien liegen im unteren Bereich des Diagrammes, in diesen Bilanzräumen ist die abgelagerte Sedimentmasse nur gering.

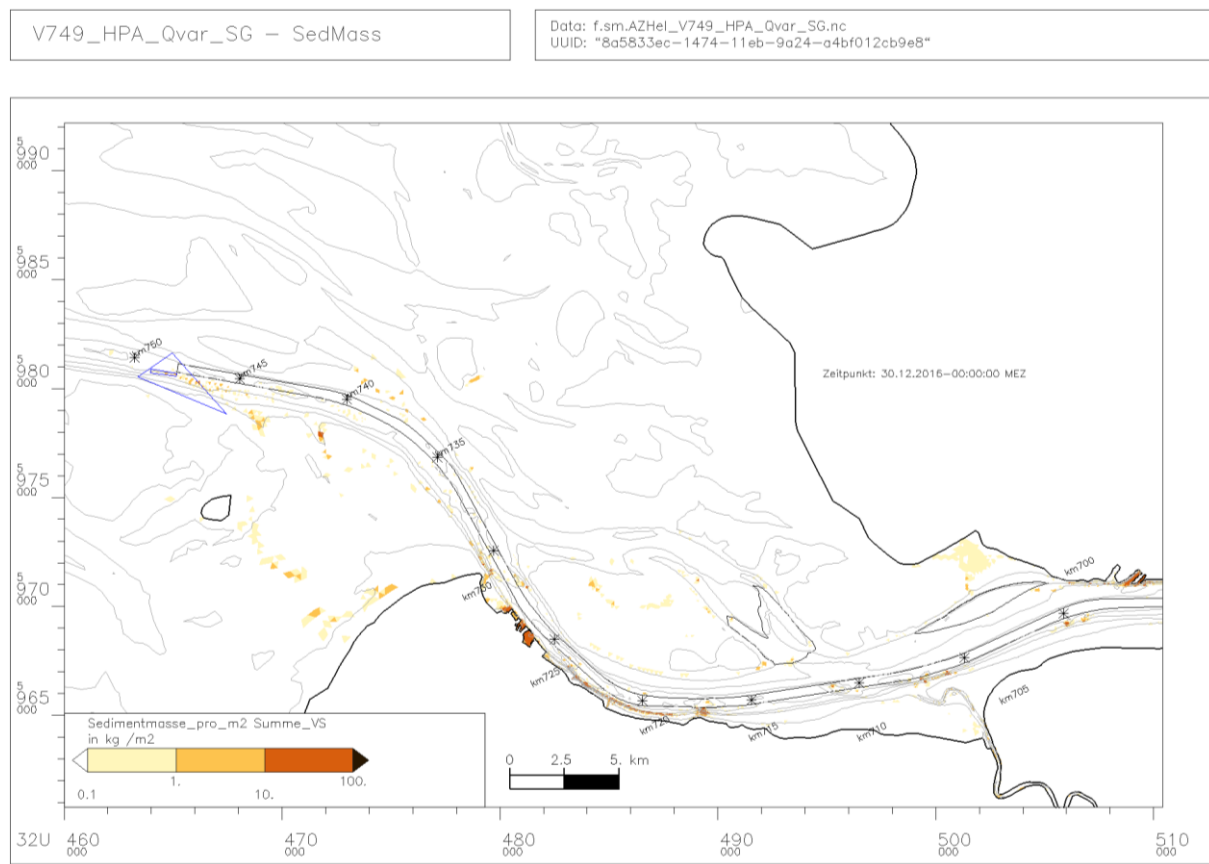


Bild 24: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen in der Außenelbe nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

Bild 25 zeigt die Entwicklung der Sedimentmasse am Boden über die Zeit in allen Bilanzräumen für das 95. (oben) und das 50. Perzentil (unten) innerhalb des jeweiligen BZR nach 9 Monaten Simulationszeit. Der Großteil der Linien liegt im unteren Bereich der Grafik und ist nicht mehr einzeln erkennbar. In diesen BZR sind die Mächtigkeiten sehr gering (< 1 cm), sodass diese Bereiche hier nicht näher betrachtet werden. Die gelbe Linie stellt die unmittelbare Verbringstelle dar. Da hier das Baggergut ausschließlich bei der VS 749 abgelegt wurde, zeigt diese Linie zu Beginn der Simulation sehr hohe Sedimentmassen an und reicht über den Diagrammbereich hinaus, aufgrund der Erosion von der VS wird die Sedimentmasse jedoch auch schnell kleiner. Die weiteren deutlich hervortretenden Linien stehen für die Bilanzpolygone 04_Uferbereich_Cux, 08_Tideelbe_vor_Brunsbuettel, 35_Grimmershoerner_Bucht und 54_Cux_Hafen. Dies sind alles Gebiete, welche die zuvor genannten Kriterien der strömungsberuhigten Verhältnisse erfüllen. Bis auf den Hafen Cuxhaven wird bei Betrachtung des 50. Perzentils deutlich, dass es sich um einzelne, stärker beaufschlagte, kleinräumige Teilgebiete innerhalb der BZR handelt, wie auch in Bild 24 erkennbar ist, und die hohen Ablagerungen nicht großflächig im Bilanzraum zu finden sind. Die Häfen von Cuxhaven und Brunsbüttel sind darüber hinaus Bereiche, welche in der Praxis regelmäßig unterhalten werden und somit nicht davon auszugehen ist, dass die genannten Mächtigkeiten, welche auf der Annahme beruhen, dass große Mengen Baggergut zeitgleich eingebracht wurden und über 9 Monate sedimentieren können, tatsächlich auftreten werden.

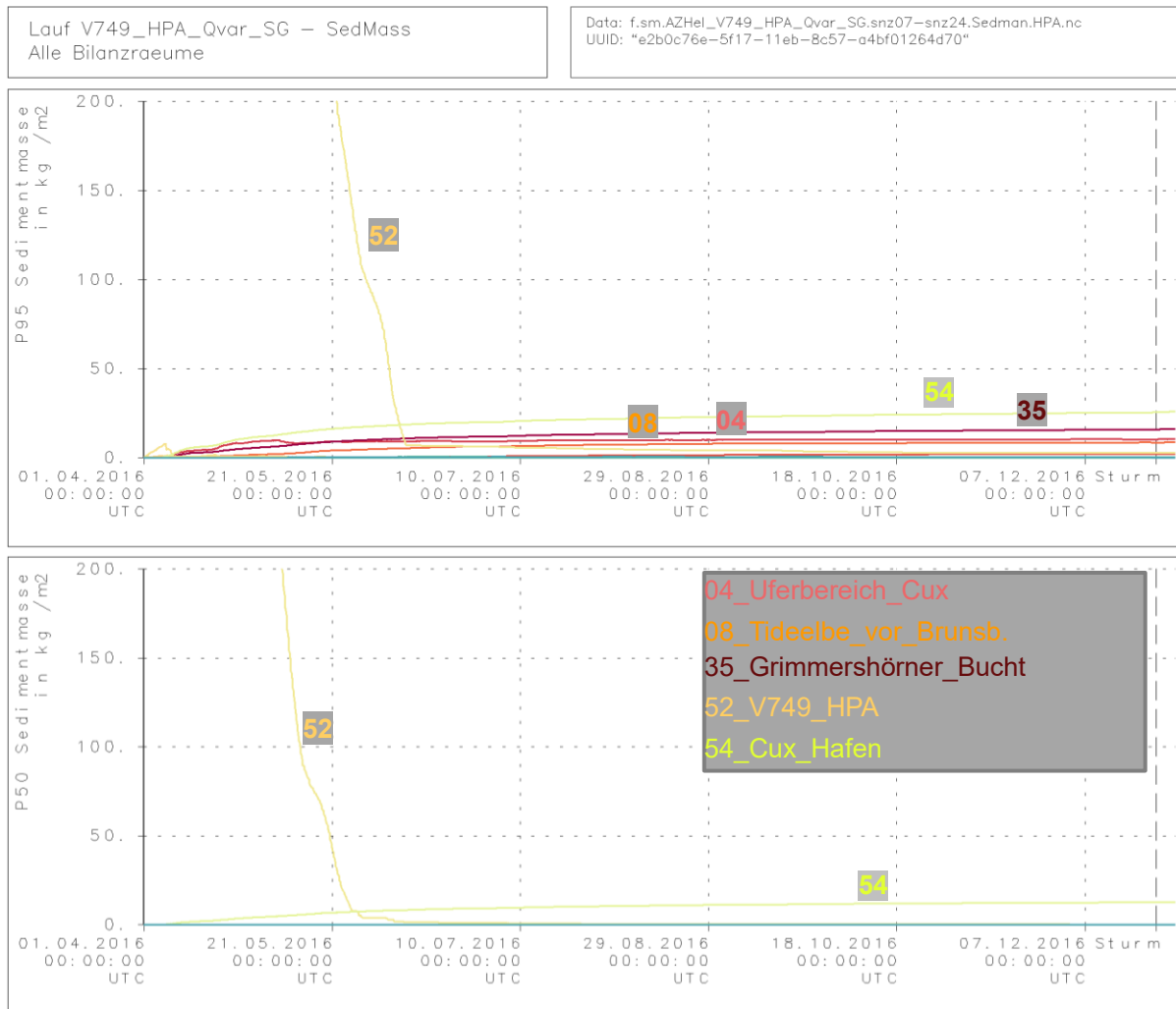


Bild 25: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen über 9 Monate für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG; oben: 95. Perzentil, unten: 50. Perzentil

Zur Einordnung der absoluten Mengen an Baggergut, welche in Bild 24 und Bild 25 für die Fläche bzw. über die Zeit für alle Bilanzräume dargestellt ist, ist außerdem der Anteil von Baggergut in der obersten Bodenschicht des Modells (Austauschschicht) von Interesse. Dafür wird der Anteil des Baggerguts am Gesamt-Sedimentinventar des jeweiligen Gebietes innerhalb der Austauschschicht ermittelt. Die Austauschschicht beinhaltet die oberen 16 cm des Modellbodens. Diese Schichtdicke befindet sich in ähnlicher Größenordnung wie die Mächtigkeit der belebten Bodenzone, welche für die Beurteilung der Schadstoffe in der Auswirkungsprognose mit 20 cm (HPA 2021) angesetzt wird.

Der Anteil des Baggerguts in der Austauschschicht ist, analog zu den vorigen Bildern, in Bild 26 über den Simulationszeitraum für alle BZR dargestellt. Außerhalb der unmittelbaren Verbringstellen bleibt dieser Anteil unter 5 %. Am Ende des Simulationszeitraums wird durch die Sturmflut (siehe Kapitel 5.4) sehr viel Sediment (hauptsächlich Hintergrundsediment, da sich das Baggergut bereits weiträumig verteilt hat) mobilisiert und weitertransportiert. Dadurch verringert sich der Anteil an Baggergut in der Austauschschicht erneut deutlich und liegt anschließend noch

einmal niedriger. In allen weiteren Bilanzräumen liegen die Linien am unteren Rand des Diagramms im Bereich deutlich unterhalb von 2 %. Alle genannten Zahlen beziehen sich auf die Baggergutmenge im Modell von 124.660 t TS und den Simulationszeitraum von 9 Monaten.

Die Sedimentmasse (Bild 25) nähert sich für alle Bilanzräume einem Wert an, hat diesen nach 9 Monaten jedoch noch nicht überall erreicht. Der Anteil von Baggergut am Gesamtsediment in der Austauschschicht (Bild 26) erreicht nach etwa drei bis vier Monaten ein Maximum und fällt im Anschluss wieder. Es ist aufgrund der Durchmischung mit dem Hintergrundsediment und der hohen Morphodynamik in der Außenelbe nicht davon auszugehen, dass der Anteil der Sedimentmasse des Baggergutes am Gesamt-Sedimentinventar nach Ablauf der 9 Monate noch nachweisbar ansteigt, sodass dieser Zeitraum für die Simulation als ausreichend angesehen werden kann. Diese Analyse zeigt, dass sich das Baggergut in das Hintergrundgeschehen eingefügt hat und die weitere Ausbreitung von den hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen sowie weiteren anthropogenen Einflüssen dominiert wird.

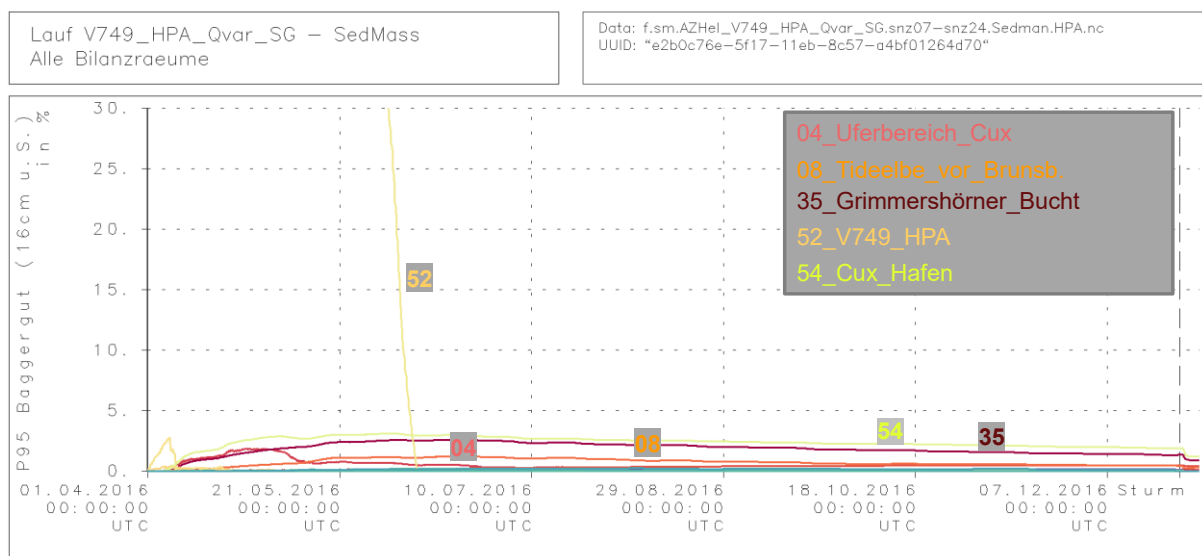


Bild 26: 95. Perzentil der Sedimentmasse als Anteil der Summe der Baggergut-Fractionen an der Summe aller Fractionen innerhalb der oberen Bodenschicht über 9 Monate für alle Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

Die wesentlichen Ergebnisse der Modelluntersuchungen in Bezug auf die Sedimentablagerungen am Boden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nach 9 Monaten Simulationszeit lassen sich Sedimentationsschwerpunkte hauptsächlich im Bereich des Elbmündungstrichters feststellen. Diese befinden sich meist in strömungsberuhigten Gebieten, Seitenbereichen, Hafenbecken und Buchten und beschränken sich häufig auf wenige Gitterzellen.
- Die Analysen zeigen, dass sich das Baggergut in das Hintergrundgeschehen eingefügt hat und die weitere Ausbreitung von den hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen sowie weiteren anthropogenen Einflüssen dominiert wird.

6.3 Gesamtbilanz

Um einen Überblick über das großräumige Verhalten und den Verbleib des Baggergutes nach 9 Monaten zu erlangen, sind die Ergebnisse des Simulationslaufes V749_HPA_Qvar_SG zusätzlich zu den bisher verwendeten Bilanzräumen (beschrieben in Kapitel 3.6.3) in großräumigere Einheiten unterteilt worden. Diese sind in Bild 27 dargestellt.

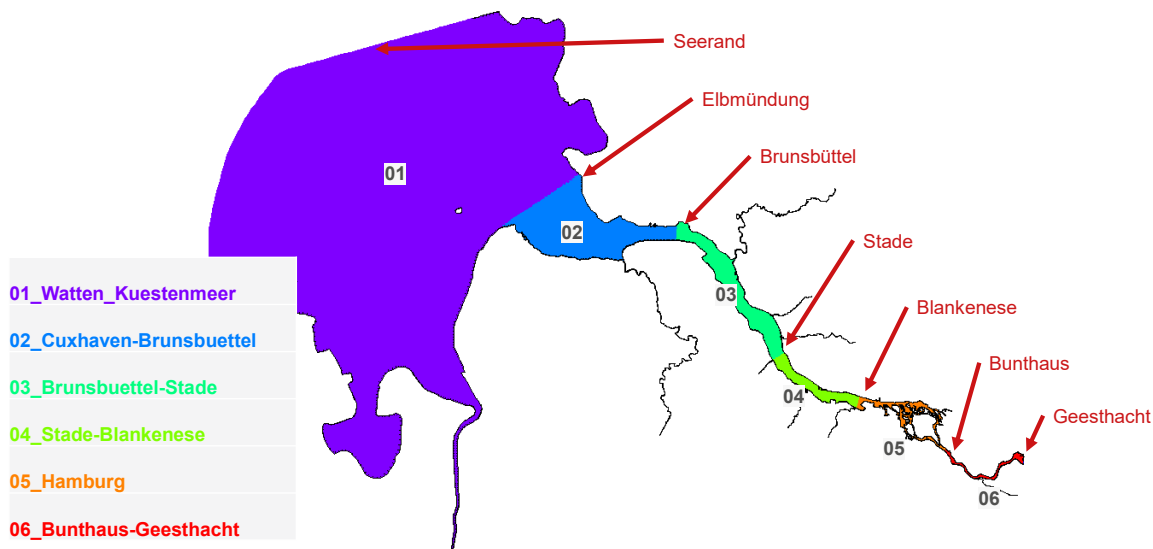


Bild 27: Großräumige Bilanzräume für das Modellgebiet, Flächen mit Nummern zeigen Bilanzräume, rote Pfeile weisen auf Austauschflächen

Die Ergebnisse für die Summe aller Baggergut-Fractionen für jeden dieser Bilanzräume sind in Bild 28 schematisch dargestellt. Die Kreise enthalten den prozentualen Anteil am Gesamt-Baggergut für Sedimentmasse (SM) und Schwebstoff (Schw), die grauen Pfeile dazwischen stellen den Transport zwischen den jeweiligen Bilanzräumen, ebenfalls als Anteil am Gesamt-Baggergut, dar.

Bei Betrachtung der Bilanz für die Summe aller Baggergut-Fractionen wird zunächst deutlich, dass Ablagerungen von Baggergut zu einem großen Teil in der Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel stattfinden. Hier liegen nach 9 Monaten Simulationszeit des Laufes V749_HPA_Qvar_SG 36 % des gesamten eingebrachten Baggergutes am Boden. Stromauf davon sind Sedimentmassen noch zwischen Brunsbüttel und Stade zu finden (9 % des gesamten Baggergutes). Noch weiter stromauf gibt es nur noch geringe Mengen. Als Schwebstoff befinden sich nach Ende der Simulationszeit noch etwa 5 % des gesamten Baggergutes im System. Zusätzlich sind die Transporte während der gesamten Simulationszeit über die Austauschflächen zwischen den Bilanzräumen bzw. über die Modellränder aggregiert worden. So lässt sich die Bewegung des Baggergutes aus dem Küstenmeer, wo es eingebracht wird, verfolgen. Ca. 10 % verbleiben als Sedimentmasse oder Schwebstoff dort, ca. 48 % werden stromauf transportiert und ca. 41 % werden über den Seerand aus dem Modellgebiet heraus transportiert. Die Abweichung von 100 % ist durch Rundung bedingt, wobei das gesamte Baggergut 100 % entspricht, also die Summe aus der Sedimentmasse des am Boden liegenden Baggergutes, der Menge an Baggergut, welcher als Schwebstoff noch in der Wassersäule vorkommt sowie der Menge an Baggergut, welche über die

Modellränder hinaus transportiert wird. Die Transporte zwischen den Bilanzräumen fallen für die Gesamtmenge nicht ins Gewicht, da diese auch in den Sedimentmassen und Schwebstoffgehalten der stromauf liegenden Bilanzräume enthalten sind.

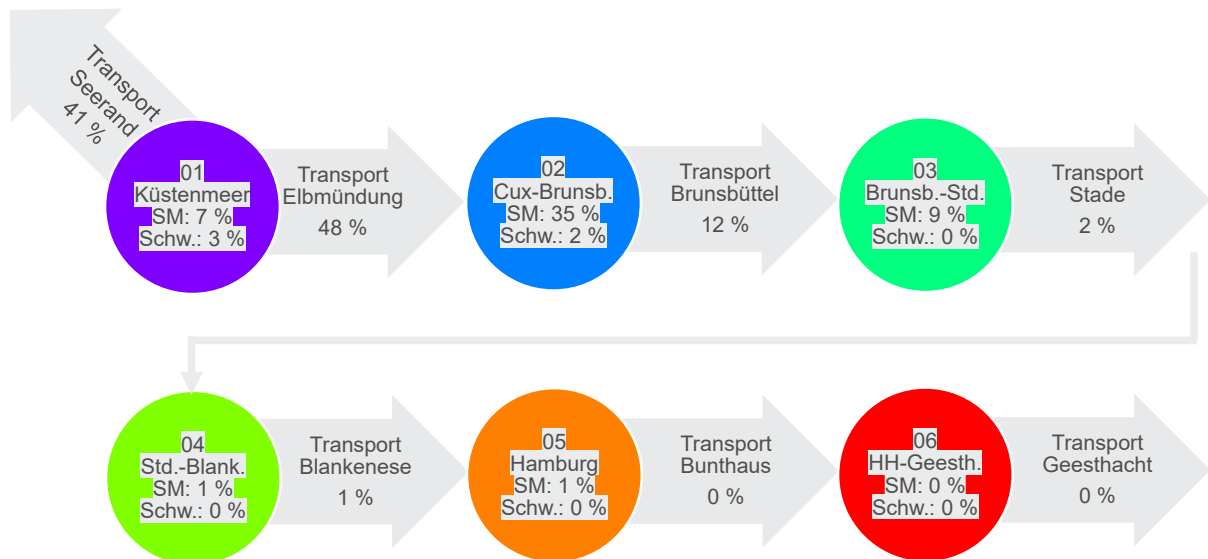


Bild 28: Gesamtbilanz nach 9 Monaten Simulationszeit für die Summe der Baggergut-Fraktionen, aggregiert über die großräumigen Bilanzräume aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG (SM: Sedimentmasse aus Baggergut am Boden als Anteil am Gesamt-Baggergut, Schw.: Schwebstoff aus Baggergut als Anteil am Gesamt-Baggergut, Pfeile: Transporte über die Austauschflächen zwischen den Bilanzräumen bzw. über die Modellränder; Gesamt-Baggergutmasse entspricht der Summe aus SM, Schweb und dem Transport über den Seerand; alle Werte auf ganze Zahlen gerundet, daraus resultieren Abweichungen von 100 %)

Im nächsten Schritt werden diese Aussagen differenzierter, bezogen auf die einzelnen Baggergut-Fraktionen betrachtet. Dies lässt sich anhand der nachfolgenden Diagramme darstellen. Die Sedimentmasse (Bild 29) bzw. der Schwebstoffgehalt (Bild 30) innerhalb jedes Bilanzraumes nach 9 Monaten sind mithilfe der Balken für die einzelnen Fraktionen dargestellt (y-Achse auf der linken Seite). Die orangenen Markierungen und zugehörigen Prozentangaben beschreiben den Anteil der Summe der Baggergut-Fraktionen am gesamten Baggergut (y-Achse auf der rechten Seite). Dies ist mit den Zahlen aus Bild 28 vergleichbar. Bild 31 enthält analoge Informationen für die Transporte über die Austauschflächen.

Wie bereits bei der Summe der Baggergut-Fraktionen erkennbar ist, verbleibt ein großer Teil der Sedimentmasse (Bild 29) im Elbmündungsgebiet. Diese besteht hauptsächlich aus „Very Fine Sand VS“ (blauer Balken) und „Coarse Silt VS“ (roter Balken). Es handelt sich hier also um die gröberen Fraktionen aus dem Baggergut. Schwebstoff (Bild 30) ist am Ende der Simulationszeit hauptsächlich im Bilanzraum Küstenmeer und zu einem geringeren Anteil auch im Mündungstrichter zu finden. Hierbei ist zu beachten, dass die absolute Menge und somit auch der Anteil am Gesamt-Baggergut um eine Größenordnung kleiner ist, als bei der Sedimentmasse. Der

verbliebene Schwebstoff besteht hauptsächlich aus der Fraktion „Medium Silt VS“. Schließlich wird der Transport der einzelnen Fraktionen über die Austauschflächen betrachtet (Bild 31). Die größte Menge an Baggergut wird stromauf, in den Mündungstrichter transportiert, wie sich auch an der Sedimentmasse zeigt. Dieser Anteil besteht jedoch hauptsächlich aus den gröberen Fraktionen, während die feineren Fraktionen „Medium Silt VS“ und „Fine Silt VS“ zu großen Teilen (zusammen etwa 80 % an der Gesamtmasse dieser Fraktionen) über den Seerand aus dem Gebiet ausgetragen werden und nach Ende der Simulationszeit nur noch zu einem geringen Anteil im Modellgebiet auffindbar sind. Je feiner die Fraktion ist, desto stärker ist die Tendenz des Transportes über den Seerand. Es findet also eine deutliche Sortierung des Baggergutes nach Fraktionen statt. Während sich die gröberen Fraktionen im Mündungsbereich in den strömungsberuhigten Gebieten (siehe auch Kapitel 6.2) ablagern, werden die feineren Fraktionen zu einem großen Anteil über den Seerand ausgetragen. Dieses Verhalten ist bereits in Kapitel 6.1 bei der Betrachtung der advektiv transportierten Rest-Sedimentmenge erkennbar (Bild 17).

Wie anhand der Betrachtung der Sturmflut sowie des Einflusses von Seegang (Kapitel 5.3) deutlich wurde, hängt diese Verteilung jedoch maßgeblich von den meteorologischen Randbedingungen ab. Daher gibt diese Verteilung einen Anhaltspunkt und eine Orientierung in Bezug auf das Verhalten des Baggergutes, jedoch kann die Verteilung in einem anderen Jahr, mit anderen Verhältnissen, auch hiervon abweichen. Als Hilfe zur Beurteilung der Variabilität dienen die Systemstudien aus Kapitel 5.

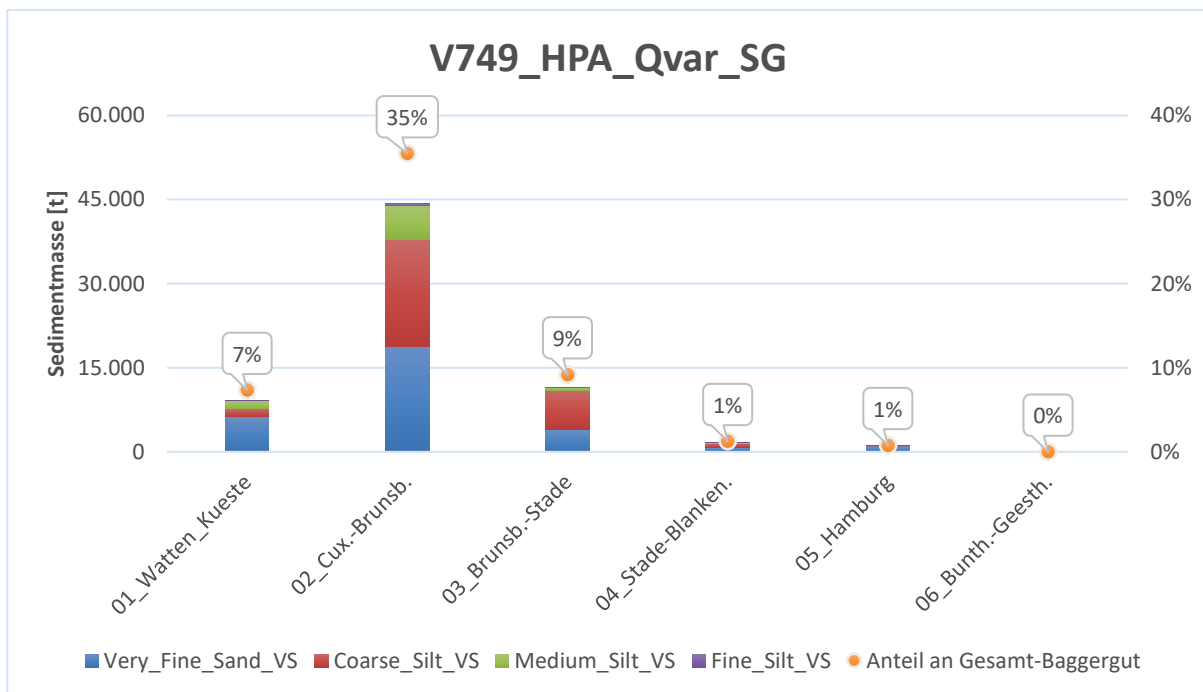


Bild 29: Gesamtbilanz der Sedimentmasse am Boden nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fraktionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut

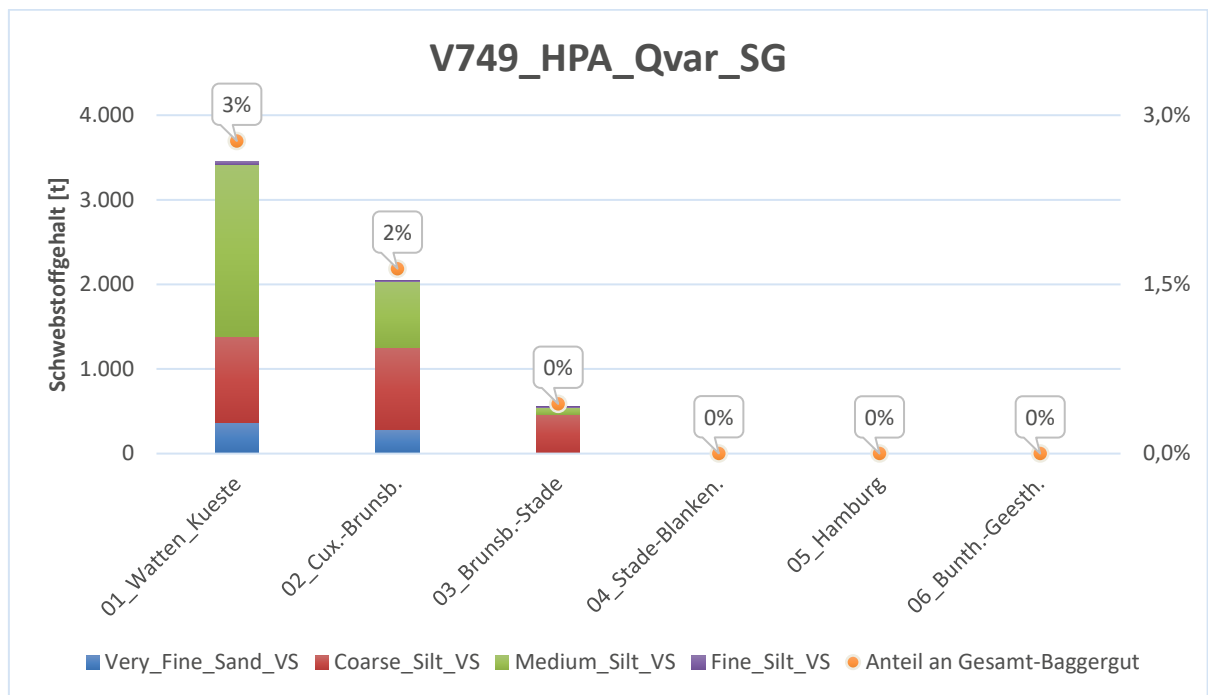


Bild 30: Gesamtbilanz des Schwebstoffgehaltes nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fractionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut

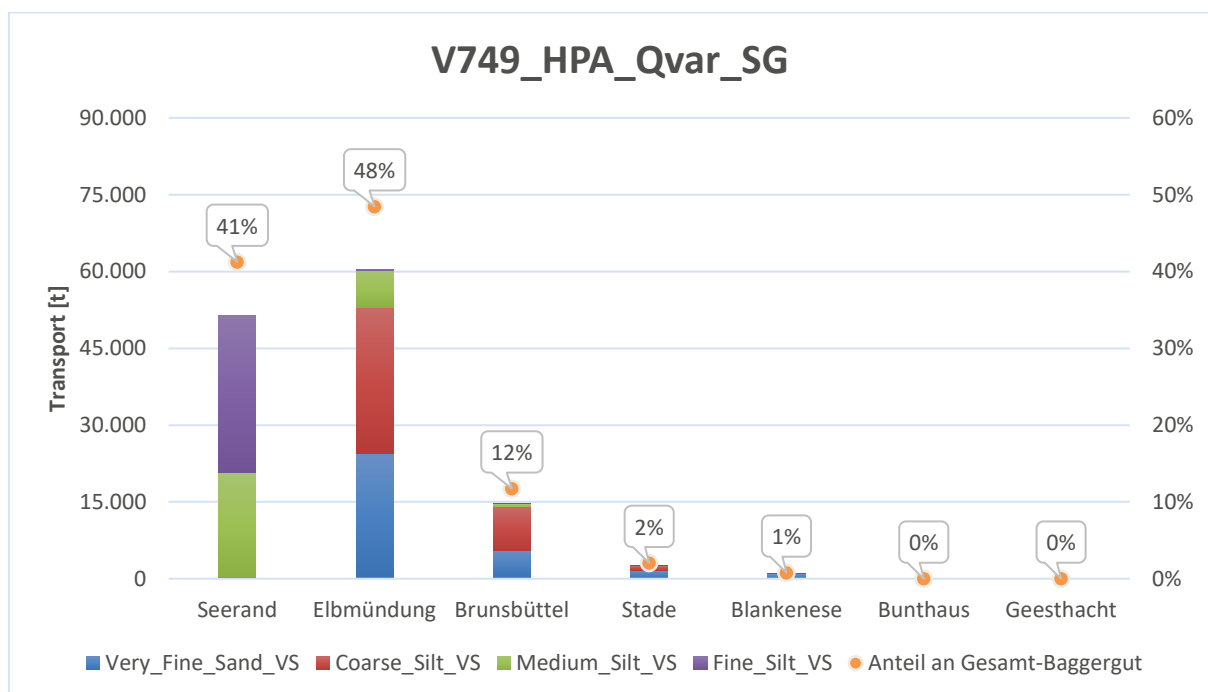


Bild 31: Gesamtbilanz des Transportes über die Austauschflächen nach 9 Monaten Simulationszeit für die einzelnen Baggergut-Fractionen in den großräumigen Bilanzräumen, sowie der Anteil am Gesamt-Baggergut (Hinweis: Die Summe der Prozentangaben ist größer als 100 %, da die Transporte oberstrom vorher in die Elbmündung hinein transportiert werden mussten und somit mehrfach vorkommen)

Die wesentlichen Ergebnisse der Modelluntersuchungen anhand einer großräumigen Bilanzierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es findet eine Sortierung des Baggergutes nach Fraktionen statt. Während sich die gröberen Fraktionen im Mündungsbereich in den strömungsberuhigten Gebieten ablagern, werden die feineren Fraktionen zu einem großen Anteil über den Seerand ausgetragen.
- Ca. 35 % des gesamten eingebrachten Baggergutes liegen nach 9 Monaten Simulationszeit zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel am Boden. Dieser Teil besteht hauptsächlich aus den Fraktionen „Very Fine Sand“ und „Coarse Silt“.
- Ca. 41 % des gesamten eingebrachten Baggergutes wurden nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Modellgebiet heraus in die Nordsee transportiert. Dieser Teil besteht hauptsächlich aus den Fraktionen „Fine Silt“ und „Medium Silt“.

6.4 Vergleich zwischen VS „Hamburger Außenelbe“ und VSB 730/740

Da die VS „Hamburger Außenelbe“ in räumlicher Nähe zum in BAW (2021) untersuchten VSB 730/740 liegt und die Untersuchungsmethoden analog gewählt wurden, werden hier einige Ergebnisse verglichen. Dafür werden die Ergebnisse für VS 738_5 herangezogen, da die Baggergut-mengen dort in einer ähnlichen Größenordnung sind wie die bei VS 749 eingebrachten (vgl. Kapitel 4.3).

Die maximalen Schwebstoffgehalte treten hauptsächlich im Nahbereich der Verbringstelle auf und sind somit abhängig vom Einbringverfahren und den Strömungsverhältnissen. In weiter entfernten Gebieten sind die Schwebstoffgehalte aufgrund des Baggergutes so weit verdünnt, dass nur selten maßgebliche Erhöhungen auftreten. Anhand des Beispiels „Hamburgisches Wattenmeer“ (Bild 21 in diesem Gutachten und Bild 54 in BAW (2021)) wird erkennbar, dass die absoluten Schwebstoffgehalte sowie der Anteil am Gesamt-Schwebstoff sich bei beiden Verbringstellen in einer ähnlichen Größenordnung bewegt. Ein Unterschied liegt darin, dass die maximalen Schwebstoffgehalte aufgrund der Umlagerung von Baggergut in der VS „Hamburger Außenelbe“ früher eintreten als bei Umlagerung im VSB 730/740, was anhand des geringeren räumlichen Abstandes zum BZR „Hamburgisches Wattenmeer“ begründet werden kann.

Die Sedimentmasse am Boden nach 9 Monaten kann als Differenz zwischen den Läufen „V738_5_Qvar_SG“ und „V749_HPA_Qvar_SG“ dargestellt werden. In Bild 32 zeigen rote Farben eine stärkere Ablagerung in Lauf „V749_HPA_Qvar_SG“ und blaue Farben eine stärkere Ablagerung in Lauf „V738_5_Qvar_SG“ an. Aufgrund der Lage der VS 749 auf der anderen Seite der Fahrrinne sowie weiter stromab wird von dort etwas mehr Baggergut in das Gebiet zwischen Neuwerk und Niedersächsischer Küste verdriftet, während die Ablagerungen im Mündungstrichter geringer sind. Die Differenzen beschränken sich auf wenige lokal begrenzte Gebiete und übersteigen nur in sehr vereinzelter Gitterzellen 1 kg/m^3 und somit 1 mm (Umrechnung siehe Kapitel 3.6.1).

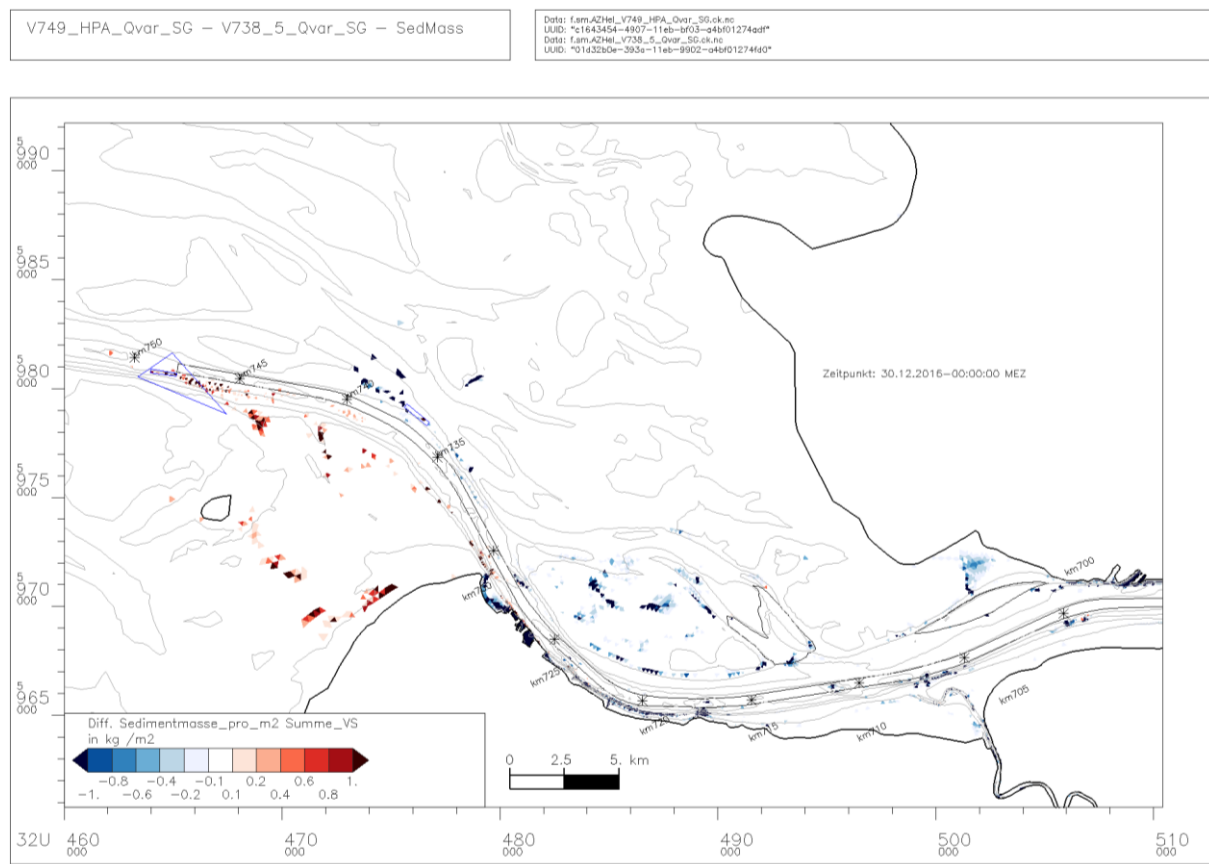


Bild 32: Differenz der Sedimentmasse am Boden aus Lauf V749_HPA_Qvar_SG und Lauf V738_5_Qvar_SG in der Außenelbe nach 9 Monaten Simulationszeit; rote Farbtöne: mehr Ablagerung im Lauf V749_HPA_Qvar_SG, blaue Farbtöne: mehr Ablagerung im Lauf V738_5_Qvar_SG

Unabhängig von der Baggergutmenge, welche im Modell eingebracht wird, können die prozentualen Anteile am Gesamt-Baggergut aus der großräumigen Bilanz in Kapitel 6.3 verglichen werden. Diese sind im Vergleich zwischen den Läufen V738_5_Qvar_SG und V749_HPA_Qvar_SG in Tabelle 4 zusammengefasst. Bezüglich der Transportrichtungen wird auf Bild 28 und Bild 29 verwiesen. Hier ist erkennbar, dass der Transport in die Elbe aufgrund der Umlagerung im VSB 730/740 mit einem Anteil von 60 % am Gesamtbaggergut größer ist, als bei Umlagerung in der VS „Hamburger Außenelbe“ mit einem Anteil von 48 %. Dies führt wiederum zu einer geringeren Ablagerung von Baggergut im Mündungstrichter im Lauf V749_HPA_Qvar_SG von 35 % im Vergleich zu 47 % in Lauf V738_4_Qvar_SG. Bei Umlagerung in der VS „Hamburger Außenelbe“ ist hingegen der Transport über den Seerand des Modells deutlich größer (41 % im Vergleich zu 31 %).

Tabelle 4: Prozentuale Anteile am Gesamt-Baggergut je BZR für Sedimentmasse, Schwebstoffgehalt und Transporte (Pfeil zeigt Transportrichtung an, vgl. auch Bild 28) zwischen den BZR für Lauf V749_HPA_Qvar_SG und Lauf V738_4_Qvar_SG

Bilanzraum	Sedimentmasse		Schwebstoffgehalt		Transport zw. BZR	
	V749_HPA	V738_4	V749_HPA	V738_4	V749_HPA	V738_4
Modellrand See					↑	
					41%	31%
01_Watt_Kueste	7%	5%	3%	3%		
					↓	
					48%	60%
02_Cux.-Bruns.	35%	47%	2%	2%		
					↓	
					12%	11%
03_Bruns.-Stade	9%	9%	0%	0%		
					↓	
					2%	2%
04_Std-Blanken.	1%	1%	0%	0%		
					↓	
					1%	1%
05_Hamburg	1%	1%	0%	0%		
					↓	
					0%	0%
06_Bunt.-Geesth.	0%	0%	0%	0%		
					↓	
					0%	0%
Modellrand Binnen						

7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Dieses Gutachten beinhaltet Untersuchungen zur Verdriftung von Feinsedimenten aus dem Bereich der Verbringstelle um Elbe-km 749 und umfasst eine hydro- und morphodynamische Charakterisierung des Gebietes sowie Systemstudien und konkrete Ergebnisbetrachtungen der Sedimentverdriftung aus einem numerischen Modell. Modelluntersuchungen können keine genaue Vorhersage für alle möglichen zukünftigen Verhältnisse liefern. Sie stellen vielmehr eine Datengrundlage zur Verfügung, um die Auswirkungen durch eine zukünftige Umlagerung von Baggergut in der VS „Hamburger Außenelbe“ auf der sicheren Seite liegend beurteilen zu können. Die berechneten Modellergebnisse sind von der BAW sowohl flächenhaft als auch für Bilanzräume analysiert und bewertet worden, wovon in diesem Gutachten wesentliche Ergebnisse beschrieben werden. Die Auswertungen beziehen sich auf die Sedimentmasse, welche sich im Modell am Gewässerboden ablagert, sowie den berechneten Schwebstoffgehalt (hier: Konzentration der in Suspension befindlichen Sedimente).

Um die komplexen hydro- und morphodynamischen Prozesse in einem Tidefluss wie der Elbe in einem numerischen Modell abbilden zu können, werden an verschiedenen Stellen Vereinfachungen der Realität vorgenommen. Diese dienen z.B. nicht nur der Reduktion von Rechenzeiten und Datenmengen (z.B. die zeitliche und räumliche Auflösung), sondern sind auch wesentlich durch den Stand der Wissenschaft begründet. Einige Prozesse sind aktuell noch Gegenstand der Forschung, sodass diese bisher nicht vollumfänglich in Modellen beschrieben oder mit Daten verifiziert werden können. Die Annahmen wurden in der Regel so gewählt, dass die Modellergebnisse auf der sicheren Seite liegend bewertet werden können. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse in einer realistischen Größenordnung liegen, bei Unsicherheiten Annahmen aber so getroffen wurden, dass es überwiegend bereits bei der Berechnung der Modellergebnisse eher zu einer Über- statt einer Unterschätzung der dargestellten Auswirkungen kommt.

Anhand der **hydro- und morphodynamischen Charakterisierung des Elbmündungsgebietes** in Kapitel 4 wird deutlich, dass der Verbringstellenbereich, aber auch die umliegenden Wattflächen, Rinnen etc. einer starken Morphodynamik unterliegen. Die VS „Hamburger Außenelbe“ dient somit als Zwischenstation, von wo aus die starken Tidenströmungen das Baggergut, genauso wie alle bereits dort natürlich vorhandenen Sedimente, verteilen. Die residuelle Transportrichtung wird dabei maßgeblich von den physikalischen Eigenschaften der Sedimentpartikel, insbesondere der Sinkgeschwindigkeit, beeinflusst.

In den in Kapitel 5 beschriebenen **Systemstudien** wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Verteilung des Baggergutes, welches in der VS umgelagert wird, untersucht, um den Einfluss der natürlichen Variabilität der Randbedingungen des Systems in der folgenden Auswirkungsprognose berücksichtigen zu können. Im Folgenden sind die einzelnen Aspekte der Systemstudien kurz zusammengefasst, für detailliertere Beschreibungen wird auf BAW (2021) verwiesen:

Umlagerungsmethode im Modell:

Die Sedimentfreisetzung in dem Moment, in dem das Baggergut über die Bodenklappen eines Hopperbaggers wieder ins Gewässer gegeben wird, sowie die spätere Remobilisierung des

abgelagerten Baggerguts ist für die Berücksichtigung dieser Prozesse in numerischen Modellen nach wie vor Gegenstand wissenschaftlicher Forschung.

In der Realität findet ein konzentriertes Absinken an den Boden sowie eine Sortierung der Fraktionen nach Korngröße statt, sodass nur ein Teil des Baggergutes unmittelbar nach der Umlagerung an der Verbringstelle als suspendiertes Sediment zur Verdriftung zur Verfügung steht. Der Rest lagert sich zunächst an der Gewässersohle ab und wird von dort allmählich erodiert und verdriftet.

Um eine auf der sicheren Seite liegende Beurteilung der möglichen Sedimentverdriftung zu ermöglichen, wurden in BAW (2021) die zwei Extrema „das gesamte Baggergut liegt auf dem Grund der Verbringstelle und wird von dort durch die Strömung erodiert“ und „das gesamte Baggergut wird über die Wassersäule eingeleitet und steht sofort als suspendiertes Sediment zum Transport zur Verfügung“ betrachtet. Die Unterschiede in der großräumigen und langfristigen Verteilung der Sedimentmassen und Schwebstoffgehalte zwischen diesen beiden Varianten sind gering. In räumlicher und zeitlicher Nähe zur Umlagerung entstehen beim Einbringen des Baggergutes in die Wassersäule deutlich höhere Schwebstoffgehalte, als wenn das Baggergut auf der Sohle abgelegt wird, sodass diese Methode diesbezüglich als Überschätzung der Realität angesehen werden kann. Die Erosion des zunächst abgelagerten Baggergutes von der Sohle wird durch die zweite Variante dargestellt und erzeugt im späteren Verlauf der Simulation sowie in weiter entfernten BZR höhere Schwebstoffgehalte. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurde, liegt die tatsächliche Auswirkung der Verbringung auf den Schwebstoffgehalt zwischen diesen beiden Varianten, sodass diese eine Bandbreite beschreiben.

Oberwasserzufluss:

Der Oberwasserzufluss beeinflusst die (Sediment-)Dynamik in einem Ästuar entscheidend. Dies wird in Kapitel 5.2 beschrieben. In der Tideelbe hat der Oberwasserzufluss große Auswirkungen auf den residuellen Schwebstofftransport. Die Transportrate und -richtung ist auch vom Sedimentinventar und den Sinkgeschwindigkeiten der Fraktionen selbst abhängig. Ein höherer Oberwasserzufluss bewirkt die Verlagerung der Trübungszone in Richtung Mündung während bei einem niedrigen Oberwasserzufluss die Trübungszone weiter stromauf liegt.

Weiter draußen, im Mündungstrichter der Elbe, wird das Tideprisma, also das Wasservolumen, welches mit jeder Tide ein- und ausströmt, so groß, dass der Einfluss des Oberwasserzuflusses stark abnimmt. Auf Baggergut, welches in der VS 749 umgelagert wird, hat der Oberwasserzufluss zunächst nur noch einen geringen Einfluss. Sobald dieses Material jedoch durch die Tideströmung stromauf in den Mündungstrichter und in den Bereich der Trübungszone transportiert wurde, wird dieser Einfluss wieder größer. Trotz des geringen Einflusses im Bereich der Außenelbe ist der Oberwasserzufluss also für das Sedimentmanagement in der Tideelbe nach wie vor bedeutend.

Seegang und Sturmflut:

Seegang und Sturmfluten haben einen großen Einfluss auf die Verteilung von Baggergut aus der Außenelbe. BAW (2021) erläutert die Auswirkungen der Berücksichtigung von Seegang im Modell sowie die Wirkung von Sturmfluten auf den Sedimenttransport.

Durch den Seegang können Sedimente, welche einmal sedimentiert sind, leichter wieder mobilisiert werden. Dadurch werden Ablagerungen auf Wattflächen verringert und das Baggergut kann

sich weiter ausbreiten. Es treten unter Berücksichtigung von Seegang größere maximale Schwebstoffgehalte in allen Fraktionen (auch der Hintergrundsedimente) im Modell auf.

Im betrachteten Simulationszeitraum tritt zwischen dem 26. und 27.12.2016 eine Sturmflut auf. Diese bewirkt, dass insbesondere höher liegende Vorländer, Wattflächen und Sände stärker überflutet werden. Die höheren Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten transportieren Sedimente und somit auch Baggergut verstärkt in diese Gebiete. Dort können bereits abgelagerte Sedimente auch wieder mobilisiert werden. Es tritt durch die Sturmflut eine Umlagerung von Sediment auf, insbesondere im Bereich der höher liegenden Wattflächen, Sände und strömungsberuhigten Bereiche, was in den Modellsimulationen zu einer großflächigeren Verteilung des Baggergutes führt. Die Ergebnisse für die Sedimentablagerungen werden daher unter Berücksichtigung von Seegang sowie nach 9 Monaten, im Anschluss an die beschriebene Sturmflut, betrachtet.

Skalierbarkeit:

Das Bearbeitungskonzept sieht vor, dass die Modellergebnisse für die Beurteilung verschiedener Sedimentmanagementstrategien und Szenarien herangezogen werden können. Daher wird in BAW (2021) die Skalierbarkeit der Baggergutmengen (z.B. Hochrechnung auf größere Mengen als die in der Modellierung angesetzt) untersucht. Die Skalierbarkeit ist in der hier untersuchten Größenordnung vertretbar und führt zu plausiblen Ergebnissen. Die resultierenden Schwebstoffgehalte werden durch die Skalierung leicht überschätzt, sodass die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen. Auch eine Anpassung der Zusammensetzung des Baggergutes ist auf diesem Wege möglich.

Schließlich sind in Kapitel 6 die **Ergebnisse für die Auswirkungen der Umlagerung von Baggergut auf der Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“** auf die Schwebstoffgehalte und Sedimentmassen beschrieben. Die Ausbreitung ist von der Sinkgeschwindigkeit der jeweiligen Fraktionen abhängig. Feine Fraktionen („Fine Silt VS“, zu einem kleineren Teil auch „Medium Silt VS“) werden verstärkt von der Verbringstelle in die Nordsee ausgetragen, während die gröberen der betrachteten Fraktionen („Very Fine Sand VS“ und „Coarse Silt VS“) überwiegend im Mündungstrichter der Elbe abgelagert werden. Nur ein geringer Anteil des eingebrachten Baggergutes befindet sich am Ende der Simulationszeit als Schwebstoff in der Wassersäule. Zusätzlich zu dem Austrag von sehr feinen Fraktionen kann also angenommen werden, dass das Baggergut soweit verdünnt ist, dass es sich in das Hintergrundgeschehen eingefügt hat und nicht mehr zu einer Erhöhung von Schwebstoffgehalten oder Sedimentationsraten führt, da diese aus der Energie der Tidenströmungen resultieren. Als Gebiete, in denen vermehrt Baggergut sedimentiert, können strömungsberuhigte Bereiche abseits der Fahrrinne, Hafenbecken sowie trockenfallende Wattflächen identifiziert werden. Diese befinden sich größtenteils im Bereich der Elbmündung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel. Das Baggergut verhält sich hier analog zum Hintergrundsediment mit ähnlichen physikalischen Eigenschaften. Es handelt sich also um bekannte Sedimentationsbereiche, die durch das Baggergut zusätzlich beaufschlagt werden. Aufgrund der Durchmischung mit dem Hintergrundsediment bewegt sich der Anteil von Baggergut innerhalb der oberen Schicht des Modellbodens unter Berücksichtigung der im Modell angesetzten Baggergutmengen nach 9 Monaten Simulationszeit auch in stark beaufschlagten Bilanzräumen im einstelligen Prozentbereich.

Im Vergleich zum analog untersuchten VSB 730/740 wird Baggergut, insbesondere die sehr feinen Fraktionen, aus der VS 749 etwas stärker über den Seerand aus dem Modellgebiet transportiert und etwas weniger in die Elbmündung hinein. Beim Vergleich der Sedimentmassen ist erkennbar, dass die Ablagerungen von Baggergut aus der VS 749 im Mündungstrichter etwas geringer, im Bereich zwischen niedersächsischem Ufer und Neuwerk etwas größer sind als durch Baggergut aus dem VSB 730/740.

Durch die Umlagerung von Baggergut innerhalb des Systems nimmt das Baggergut wieder am Sedimenttransportgeschehen des Ästuars und der Deutschen Bucht teil. Durch Umlagerungen im Mündungsbereich, wie z.B. in der VS „Hamburger Außenelbe“, werden jedoch im Vergleich zu weiter stromauf gelegenen Verbringstellen Kreisläufe verlängert sowie durch Sedimentation und dadurch erforderliche Remobilisierung unterbrochen. Außerdem zeigen die Analysen, dass auch ein teilweiser (etwa 40 % des eingebrachten Baggergutes) Austrag von sehr feinen Sedimenten in die Nordsee stattfindet. Dies trägt im Vergleich zu weiter stromauf gelegenen Verbringstellen zu einer Entlastung der Baggermengen in der Unterelbe bei und ist bei der Entwicklung einer flexiblen und adaptiven Sedimentmanagementstrategie zu berücksichtigen. Eine solche Strategie sollte sich an den dynamischen vorherrschenden und erwarteten Systemzuständen orientieren und dadurch zielgerichtet den Stromauftransport von Feinsediment verringern. Als Randbedingungen für Umlagerungen sind somit zustandsbasierte Leitlinien bessere Managementindikatoren als starre Auflagen. Die zustandsbasierten Leitlinien sollten sich an den natürlichen Prozessen eines Tideflusses und den Bedürfnissen des Lebensraums orientieren.

Die quantitativen Aussagen in diesem Gutachten können immer nur unter den bereits genannten Modellgrenzen und Randbedingungen gelten. Es sind 9 Monate mit realen Randwerten aus dem Jahr 2016 unter Berücksichtigung möglichst aktueller und realistischer Topographiedaten simuliert worden. Anhand der durchgeführten Systemstudien ist unter Berücksichtigung der beschriebenen Charakteristik des Gebietes eine aussagekräftige Beurteilung für reale zukünftige Situationen möglich. Die tatsächlichen Mengen und die Zusammensetzung sind von zukünftigen hydrologischen und meteorologischen Entwicklungen und der Unterhaltungspraxis abhängig.

Die Belastbarkeit dieser Beurteilung kann im Sinne einer Beweissicherung durch begleitende Monitoringmaßnahmen nachgewiesen werden. Hierfür wäre die Entwicklung eines kombinierten Monitoringprogrammes auf Basis von numerischen Modellanwendungen und Naturmessungen zielführend. Die beiden Methoden können sich gegenseitig ergänzen, indem beispielsweise aus den Modellergebnissen die Hauptsedimentationsgebiete für eine gezielte Beprobung identifiziert werden. Daten aus so konzipierten Naturmessungen können in eine aktualisierte Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells einfließen, um jederzeit hochwertige Modellergebnisse unter Berücksichtigung der neuesten Daten als Entscheidungsgrundlage für die Umlagerungspraxis im Sinne eines flexiblen und adaptiven Sedimentmanagementkonzeptes berücksichtigen zu können.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Dezember 2021

Im Auftrag

Bearbeiterin

gez. Kelln

gez. Benndorf

Dr. Jessica Kelln

Julia Benndorf

8 Literaturverzeichnis

BAW (2006): Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Tidedynamik und Salzgehalt. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Gutachten A39550310062).

BAW (2013): Handlungsoptionen zur Optimierung der Unterhaltungsstrategie im Mündungstrichter der Tideelbe. Bundesanstalt für Wasserbau.

BAW (2019): Umlagerung von Hamburger Baggergut zu der Verbringstelle Neßsand. Bundesanstalt für Wasserbau.

BAW (2020): Auswirkung der Schaffung von Flutraum im Bereich der Tideelbe - Wasserbauliche Systemstudien der vom Forum Tideelbe konzipierten Maßnahmen. B3955030610005. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.forum-tideelbe.de/files/download/200925-baw-gutachten-forum-tideelbe-final.pdf>, zuletzt geprüft am 10.09.2021.

BAW (2021): Hydromorphologische Wirkung der Verbringung von Baggergut im Verbringstellenbereich VSB 730/740 in der Außenelbe. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg (BAW-Gutachten, B3955.03.06.10005).

Bergemann, M. (2005): Berechnung des Salzgehaltes der Elbe. Hg. v. Wassergütestelle Elbe.

BfG (2021): Auswirkungsprognose für die Unterbringung von Baggergut im Verbringstellenbereich VSB 730/740 in der Außenelbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz.

BSH (2016): Weihnachtssturmflut in der Nacht vom 26. auf den 27. Dezember 2016. Hg. v. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Nordsee_Sturmflut_20161227.pdf, zuletzt geprüft am 24.02.2021.

Casulli, V. (1999): A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic, Free-Surface Flows. In: *International Journal of Numerical Methods in Fluids* (30), S. 425–440.

Casulli, V.; Walters, Roy A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: *International Journal of Numerical Methods in Fluids* 32 (3), S. 331–348.

Casulli, V.; Zanolli, P. (1998): A Three-Dimensional Semi-Implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids. In: *Proceedings of Conference on Numerical Methods for Fluid Dynamics, University of Oxford*.

Casulli, V.; Zanolli, P. (2002): Semi-implicit numerical modeling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems. In: *Mathematical and Computer Modelling* 36 (9-10), S. 1131–1149. DOI: 10.1016/S0895-7177(02)00264-9.

Casulli, V.; Zanolli, P. (2005): High resolution methods for multidimensional advection–diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: *Ocean Modelling* 10 (1-2), S. 137–151. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007.

DWD (Hg.) (2016): Klimastatusbericht 2016. Deutscher Wetterdienst. Offenbach. Online verfügbar unter

https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2016.html?nn=16102, zuletzt geprüft am 15.04.2021.

Hagen, R.; Freund, J.; Plüß, A.; Ihde, R. (2019): Validierungsdokument - EasyGSH-DB - Teil: Un-TRIM-SediMorph-Unk. Online verfügbar unter <https://mdi-de.baw.de/easygsh/>, zuletzt geprüft am 05.02.2021.

Heyer, H.; Schrottke, K. (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht: AufMod ; gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. Hg. v. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.

HPA (2020): Gewässerkundliche Information, Gewässerkundliches Jahr 2020. Pegel Hamburg-St. Pauli. Hamburg Port Authority. Online verfügbar unter https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/Gewaesserkundliche_Information_2020.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2021.

HPA (2021): Auswirkungsprognose für die Verbringung von Baggergut zur Verbringstelle „Hamburger Außenelbe“ bei Elbe-km 749. Hamburg Port Authority. Hamburg.

HR Wallingford (2017): Dredge Disposal Plume Monitoring. Sediview Survey: Buoy E3 Dredged Material Disposal Site.

Kineke, G. C.; Sternberg, R. W. (1992): Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. In: *Marine Geology* 108 (3), S. 253–258. DOI: 10.1016/0025-3227(92)90199-R.

Lai, Adrian C. H.; Adams, E. Eric; Law, Adrian Wing-Keung (2018): Mass Loss to the Trailing Stem of a Sediment Cloud. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 144 (4), S. 6018003.

Mueller, Agmar; Puls, Walter (1996): Modelling of suspended matter transport in tidal rivers. In: *Advances in limnology* 47.

Reinert, D.; Prill, F.; Frank, H.; Denhard, M.; Baldauf, M.; Schraff, C. et al. (2021): DWD Database Reference for the Global and Regional ICON and ICON-EPS Forecasting System. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/icon/icon_dbbeschr_aktuell.pdf?view=nasPublication, zuletzt geprüft am 05.02.2021.

Truitt, Clifford L. (1988): Dredged material behavior during open-water disposal. In: *Journal of Coastal Research*, S. 489–497.

Wachler, Benno (2021): Förderung des Wattwachstums: Eine mögliche Maßnahme zum Erhalt wichtiger Funktionen des Wattenmeeres bei Meeresspiegelanstieg. Meilensteinbericht M102.3.3 des Schwerpunktthemas SPT-102 Verkehrsinfrastruktur und Anpassung im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln). Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/107483>, zuletzt geprüft am 30.04.2021.

Weilbeer, Holger; Winterscheid, Axel; Strotmann, Thomas; Entelmann, Ingo (2021): Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklung in der Tideelbe. In: *Die Küste* (89). DOI: 10.18171/1.089103.

Winterwerp, Johan C. (2002): On the Flocculation and Settling Velocity of Estuarine Mud. In: *Continental Shelf Research* 22 (9), S. 339–1360. DOI: 10.1016/S0278-4343(02)00010-9.

Witte, G. (1996): Messungen zur Kurzzeitausbreitung des eingebrachten Baggergutes mit dem ADCP- und dem Siltmeter-Verfahren. In: Umlagerung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen in der Tideelbe. Ergebnisse aus dem Baggergutuntersuchungsprogramm, Heft 7. Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde, Strom-und Hafenbau.

WSV (2016): Digitales Geländemodell des Wasserlaufes. DGM-W 2016 der Unter- und Außenelbe. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Online verfügbar unter www.kuestendaten.de, zuletzt geprüft am 13.01.2021.

9 Anlagen

9.1 Mathematische Simulationsverfahren

Die Charakterisierung von Klappstellen ist nach dem Stand von Technik und Wissenschaft mit wasserbaulichen Systemanalysen unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung möglich. Das verwendete 3D HN-Modell bildet die physikalischen Prozesse mit der Kombination der numerischen Verfahren *UnTRIM* für den Wasserkörper und *SediMorph* für die Gewässersohle dreidimensional ab.

Bei dem mathematischen Verfahren *UnTRIM* handelt es sich um eine Entwicklung, die von Prof. Vincenzo Casulli (Universität Trient, Italien) durchgeführt wurde (Casulli und Walters 2000; Casulli und Zanolli 2002; Casulli 1999; Casulli und Zanolli 1998, 2005). *UnTRIM* ist ein semi-implizites Finite - Differenzen (-Volumen) Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente. *UnTRIM* arbeitet auf einem unstrukturierten, orthogonalen Gitter. Hierbei wird das Lösungsgebiet von einer endlichen Anzahl konvexer Polygone (Dreiecke, Vierecke) überlappungsfrei überdeckt.

Das Verfahren *SediMorph* ist eine Entwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau in Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu werden Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Suspensionstransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen werden Sohlhöhenveränderungen bilanziert. Die Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung des Bodens, d.h. die Verwaltung des Sedimentinventars, die Genese von Transportkörpern und deren Rauheitswirkung etc. ist ebenfalls in *SediMorph* realisiert. Auch das Verfahren *SediMorph* arbeitet auf unstrukturierten orthogonalen Gittern.

Die folgenden physikalischen Prozesse werden in dem mathematischen Modell zur Berechnung der Hydrodynamik und des Transports gelöster Stoffe berücksichtigt:

- reynoldsgemittelte Navier - Stokes - Gleichung (RANS)
- lokale Beschleunigung (Massenträgheit)
- advective Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- barotroper Druckgradient
- barokliner Druckgradient
- hydrostatische oder nicht-hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Viskosität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- Bodenreibung
- Impulseintrag durch den Wind

- Quellen und Senken (Zu- und Abflüsse)
- Transport konservativer Tracer
- advektiver Transport durch die Strömung
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop, zeit- und ortsvariabel)
- turbulente Diffusivität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- rheologische Viskosität

Bild 33 zeigt in grafischer Form wichtige natürliche Prozesse in einem Ästuar, von denen die Wesentlichen in den Modellverfahren berücksichtigt sind. Das Baggern und Umlagern bzw. Verbringen von Baggergut ist dort nicht dargestellt. Hierfür müssen noch weitere Annahmen getroffen werden.

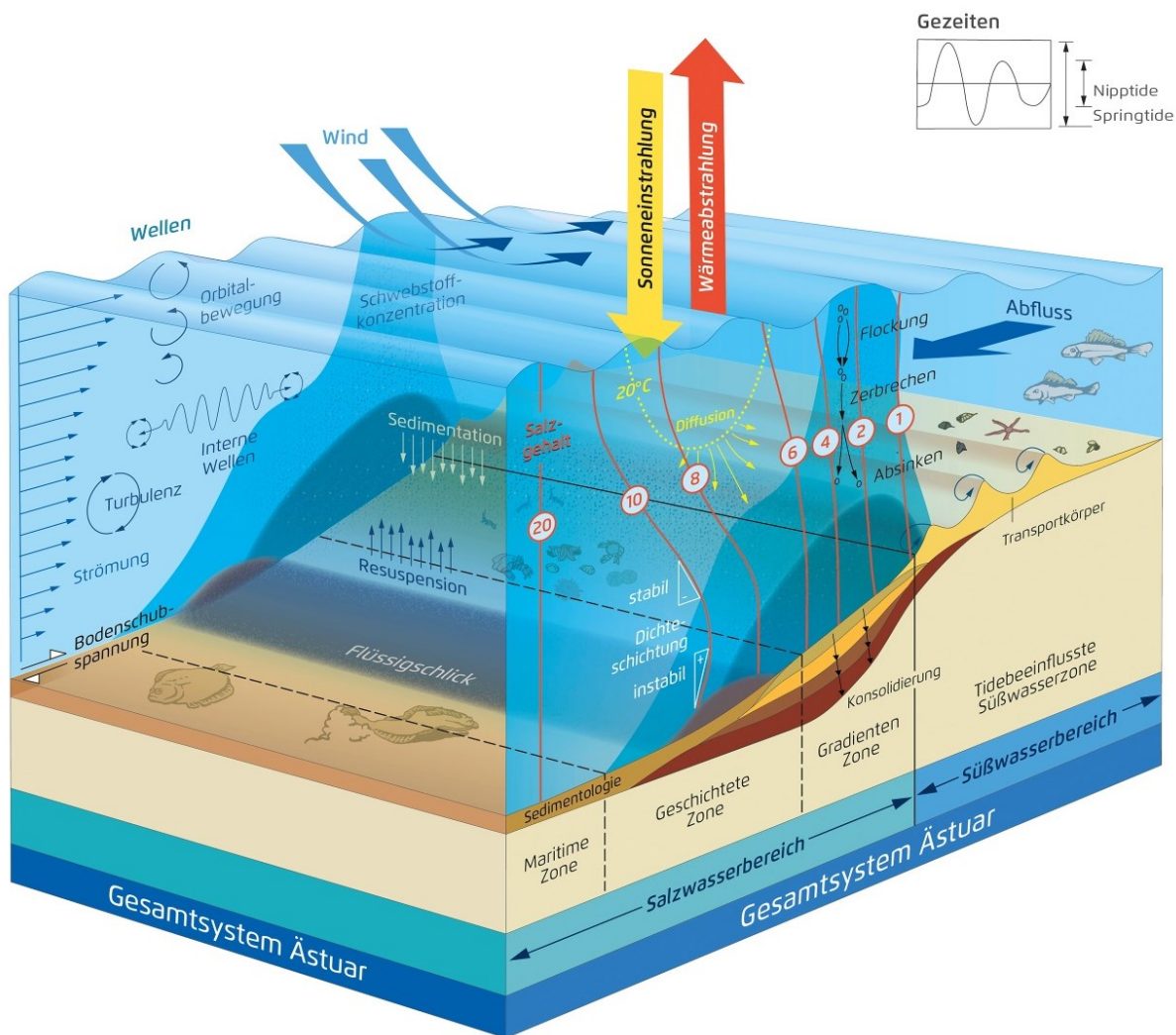


Bild 33: Natürliche Prozesse in einem Ästuar

Folgende Berechnungsergebnisse werden durch das mathematische Modell an den diskreten Berechnungspunkten geliefert:

- Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche
- Strömungsgeschwindigkeit
- Tracerkonzentration (Salzgehalt, Temperatur, Schwebstoff, ...)
- Turbulenz
- Dichte
- Ggfls. hydrodynamischer Druck

Dabei liegen die skalaren Größen (Wasserstand, Konzentration usw.) in den Polygonzentren und die vektoriellen Größen (Geschwindigkeit) auf den Mitten der Polygonränder vor.

Die örtliche Auflösung des Rechengitters und die zeitliche Auflösung der Simulation sind so gewählt worden, dass alle charakteristischen, d.h. das Gewässer prägenden physikalischen Prozesse berücksichtigt werden.

9.2 Tabellarische Auflistung aller Bilanzräume

Tabelle 5: Nummern, Bezeichnungen und Flächeninhalte der Bilanzpolygone

Teilgebiet	Flächeninhalt [m²]
00_Ausseneider	48339611
01_Wattenmeer_Weser	298930380
02_Duhner_Watt	40177977
03_Medemgrund	34824347
04_Uferbereich_Cux	3437179,9
05_Kuestenmeer_Weser_W	393495810
06_Uferbereich_Tideelbe_Ni_p1	3623555,8
07_Uferbereich_Tideelbe_Ni_p2	13039345
08_Tideelbe_vor_Brunsb.	5918705,1
09_Eider_Tidebecken	106824160
10_Dithmarscher_Bucht	255769080
11_Uferbereich_SH_Watten_p4	15097300
12_SH_Watten_noerdl.	103899290
13_Scharhoern	3924116,3
14_Stoer+Elbufer_p1	5281972,7
15_Mittelgrund	11310135
16_Tideelbe_Glueckstadt	51366068
17_Pagensand	4053913,8
18_Kuestengewaesser_Weser_W	285636580
19_Jadebusen+Weser	765764720
20_Piep_Tidebecken	331568990
21_Kuestenmeer_SH_Watten	45781365
22_Aussenelbe_Nord	207938200
23_Hakensand	44321685
24_Fahrwasser_gruener_TS_km750_bis_760	4593207,9
25_Hamburgisches_Wattenmeer_SO	66900750
26_Scharhoernriff	11762681
27_Hamburgisches_Wattenmeer_NW	51116471
28_Fahrwasser_Cux_Brunsb._roter_TS	22673995
29_Kuestenmeer_Eider_W	101549160
30_Kuestenmeer_Helgoland_O	328223410
31_Kuestenmeer_Helgoland_W	251244050
32_Tideelbe_vor_Otterndorf	35049710
33_Fahrinne_Cux_Brunsb.	15880594
34_Neufelder_Sand	20170956
35_Grimmershoerner_Bucht	1121365,1
36_Kuestenmeer_Eider_O	74363771
37_Medemgrund_S	16967300
38_FFH_Elbaestuar_vor_Brunsb.	2385587,5

39_Uferbereich_SH_Watten_p3	3408302,9
40_Kuestengewaesser_Weser_O	242725690
41_Unterelbe_Niedersachsen	41994460
42_Kuestenmeer_Helgoland	32161458
43_Kuestenmeer_Elbe_N	164004100
44_Kuestenmeer_Helgoland_NO	40753253
45_Kuestenmeer_Elbe_S	13033684
46_Kuestenmeer_Weser_O	56504306
47_Nordergruende	51282521
48_Fahrwasser_Aussenelbe	12589451
49_Fahrwasser_gruener_TS_km730_bis_747	24924643
50_Fahrwasser_roter_TS_km_729.5_bis_760	57644541
51_Nahbereich_VS749_HPA	2522313,6
52_V749_HPA	189724,1
53_Uferbereich_Cux_Otterndorf_Ostemuendung	16039047
54_Cux_Hafen	522456,39
55_Nied._Tideelbe_bei_Pagensand	6117901,2
56_Uferbereich_SH_Watten_p1	1078853
57_Uferbereich_SH_Watten_p2	6580748,7
58_Stoer+Elbufer_p2	3645830,2
59_Krueckau+Pinau+Elbufer_p1	1458923,5
60_SH_Watten_suedlich	38908144
61_Krueckau+Pinau+Elbufer_p2	3667913,5
62_Oste	5796621,2
63_Neuwerk	2597075

9.3 Weitere Abbildungen in räumlichen Ausschnitten

Im Folgenden sind weitere Abbildungen eingefügt, welche in der Auswirkungsprognose (HPA, 2021) zitiert werden. Sie sind analog zu den in Kapitel 6 gezeigten Abbildungen und beinhalten Ausschnitte daraus bzw. Darstellungen zu anderen Zeitpunkten.

9.3.1 Sedimentablagerungen am Boden

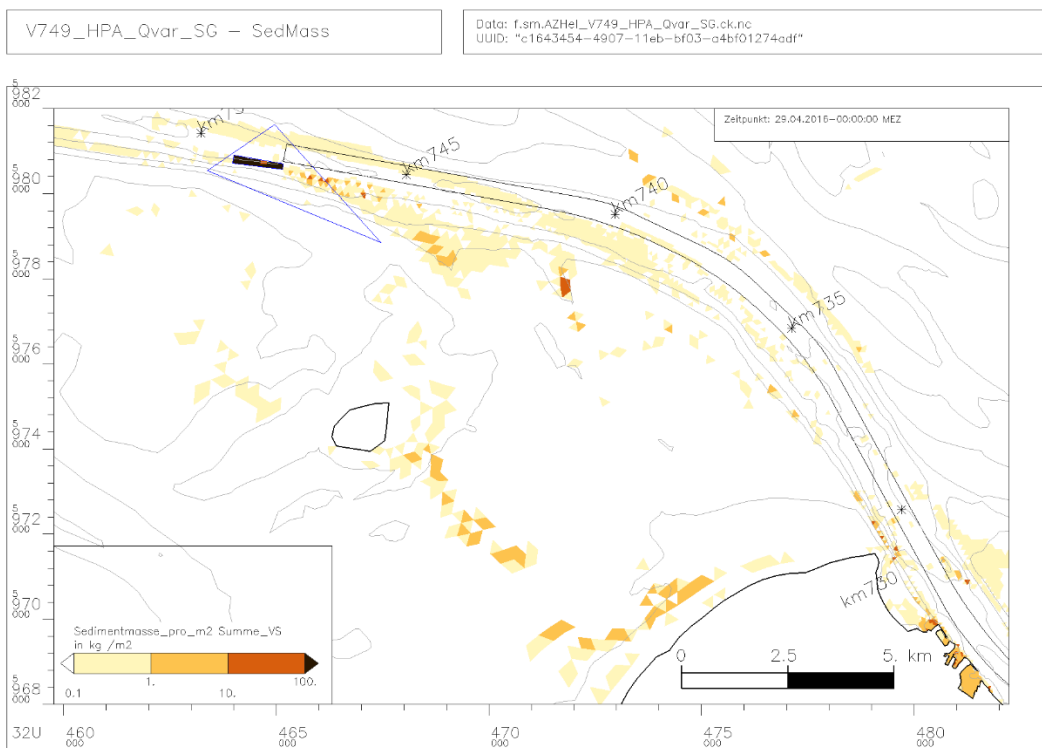


Bild 34: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

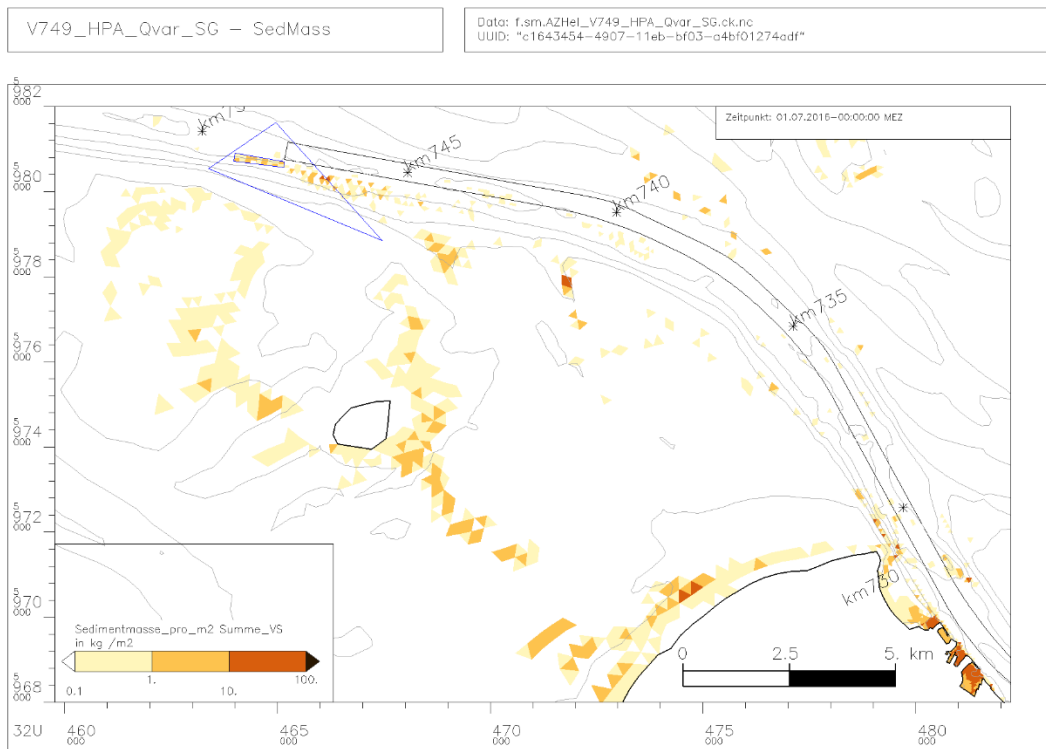


Bild 35: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

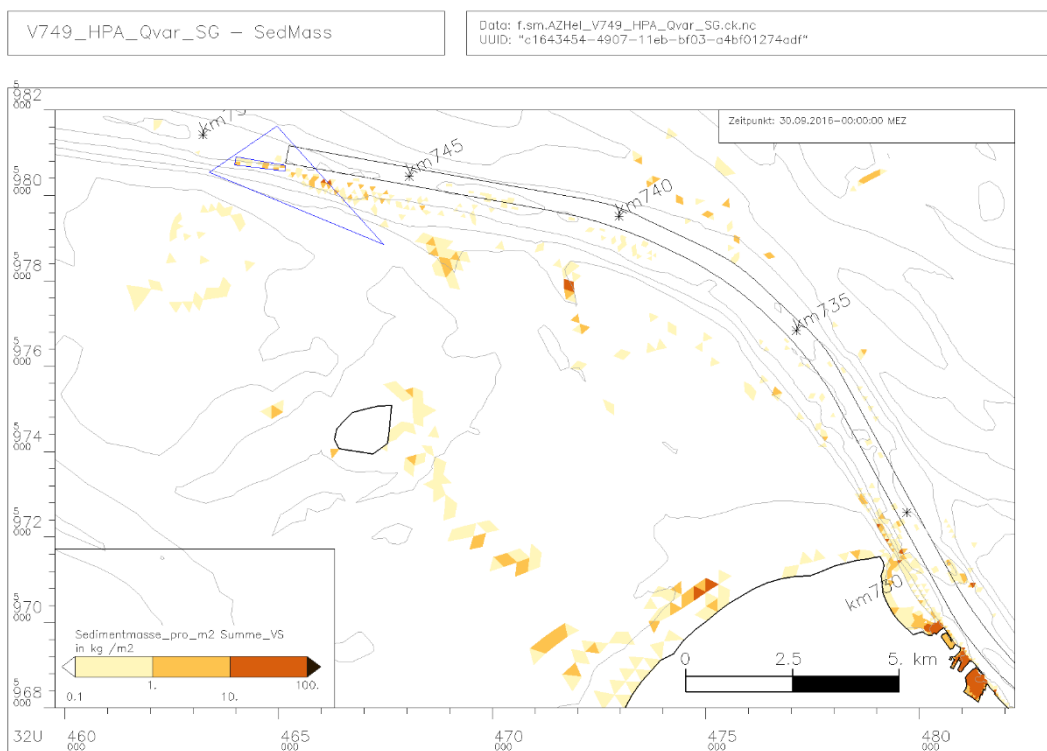


Bild 36: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

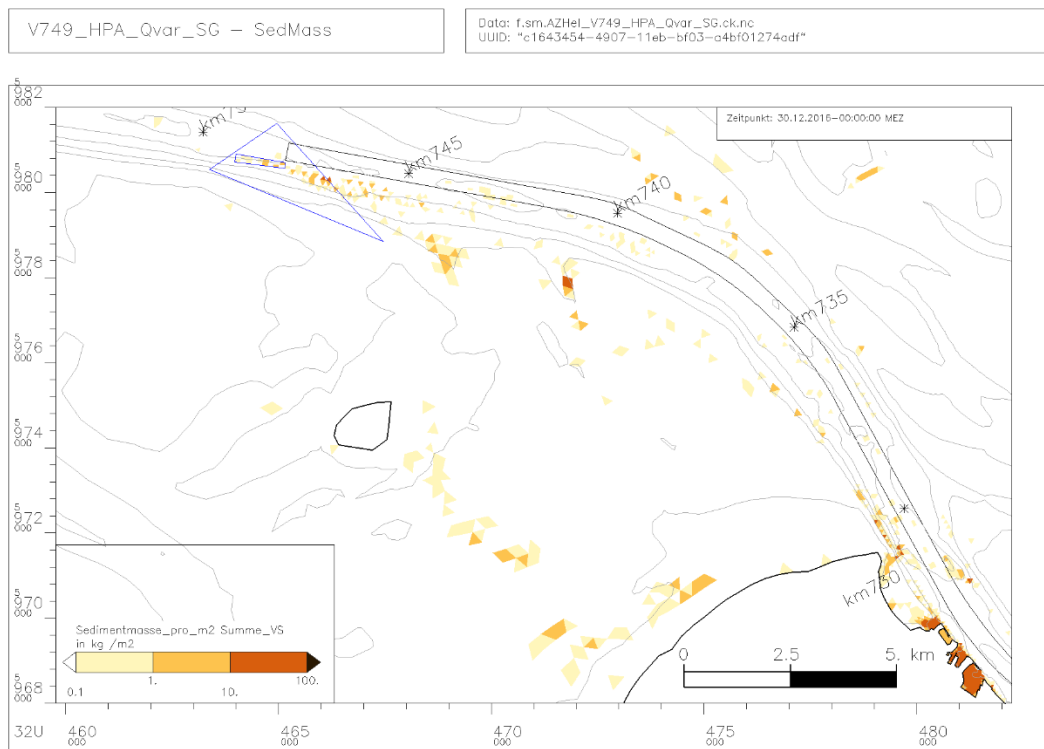


Bild 37: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

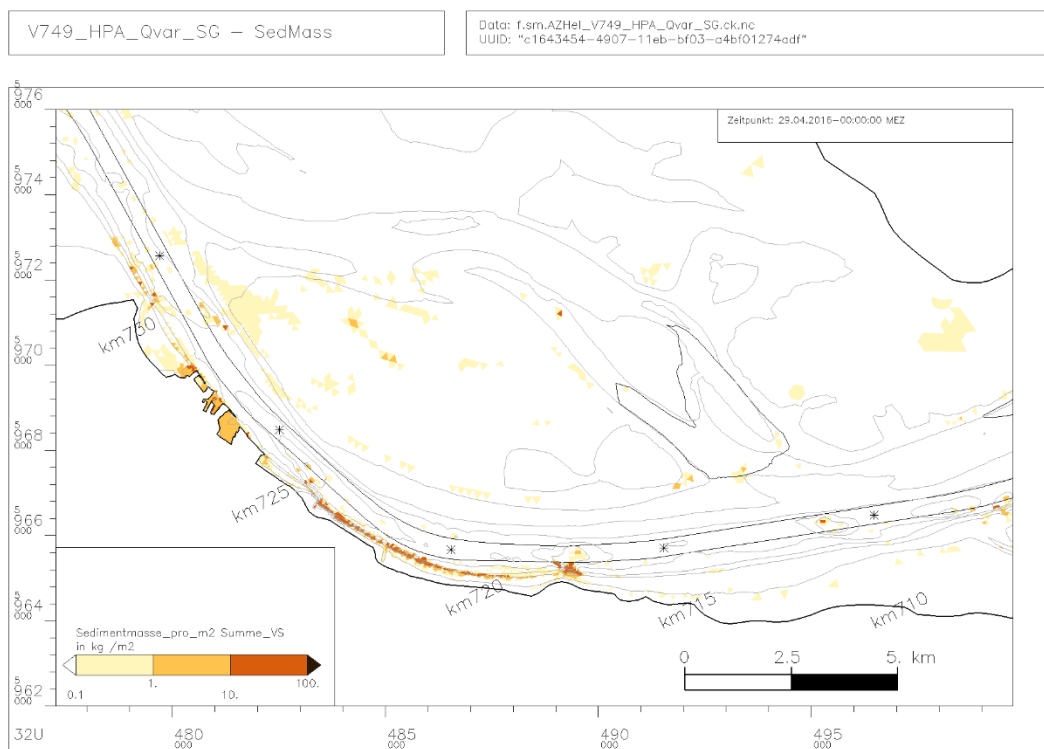


Bild 38: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

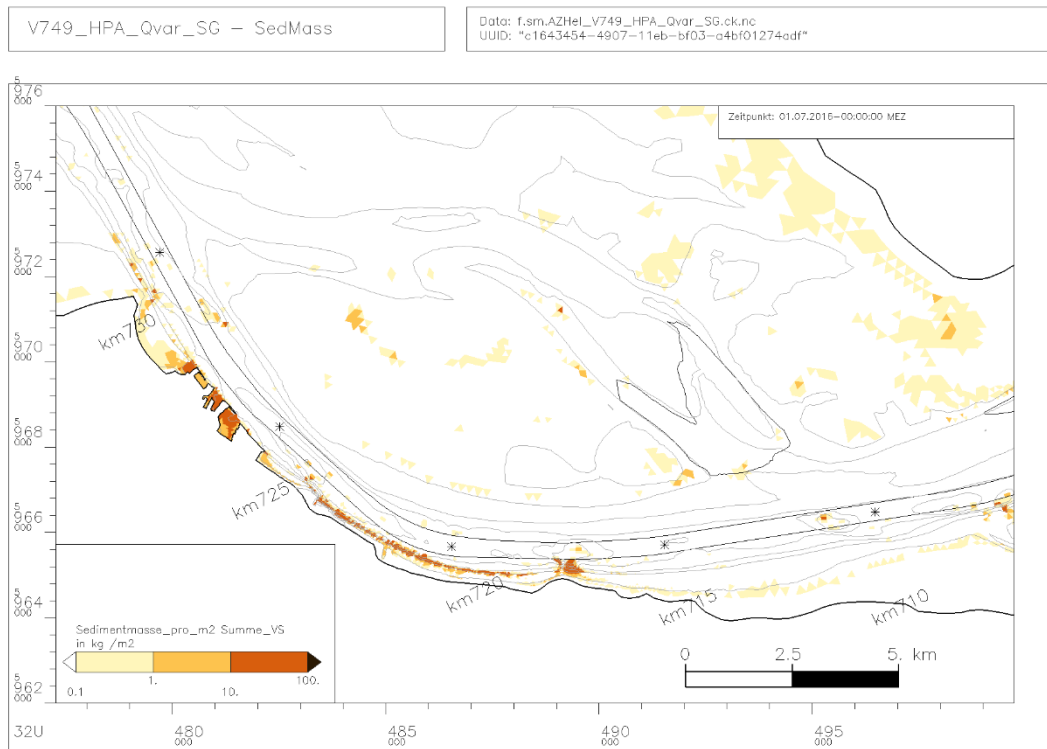


Bild 39: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Medem“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

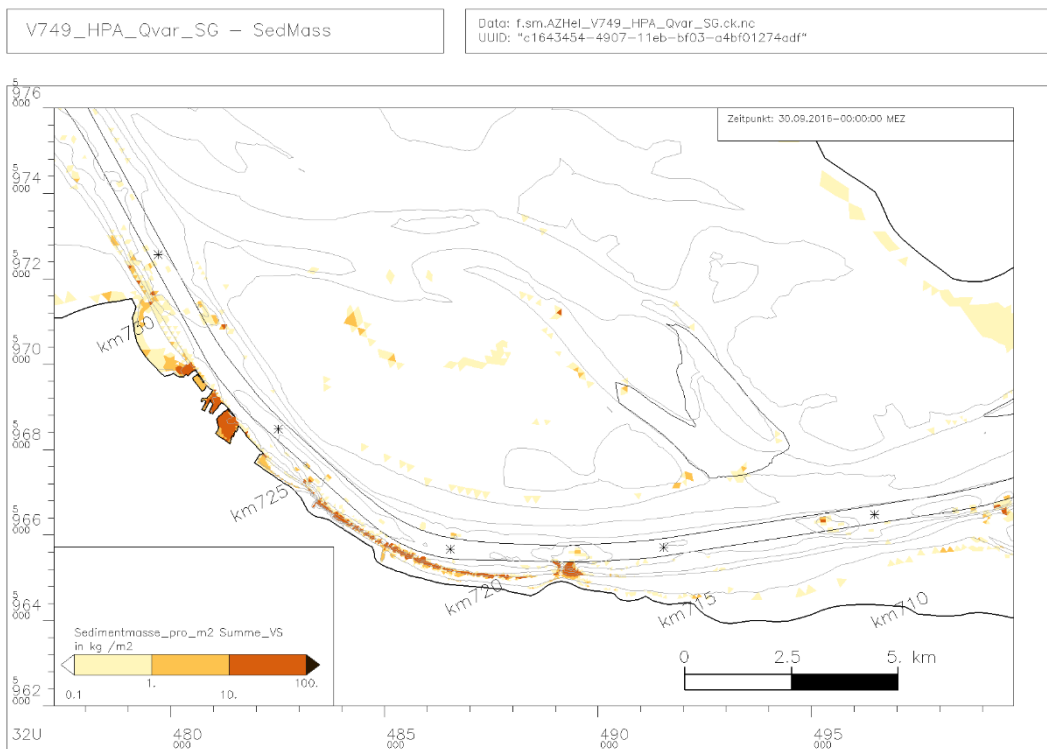


Bild 40: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Medem“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

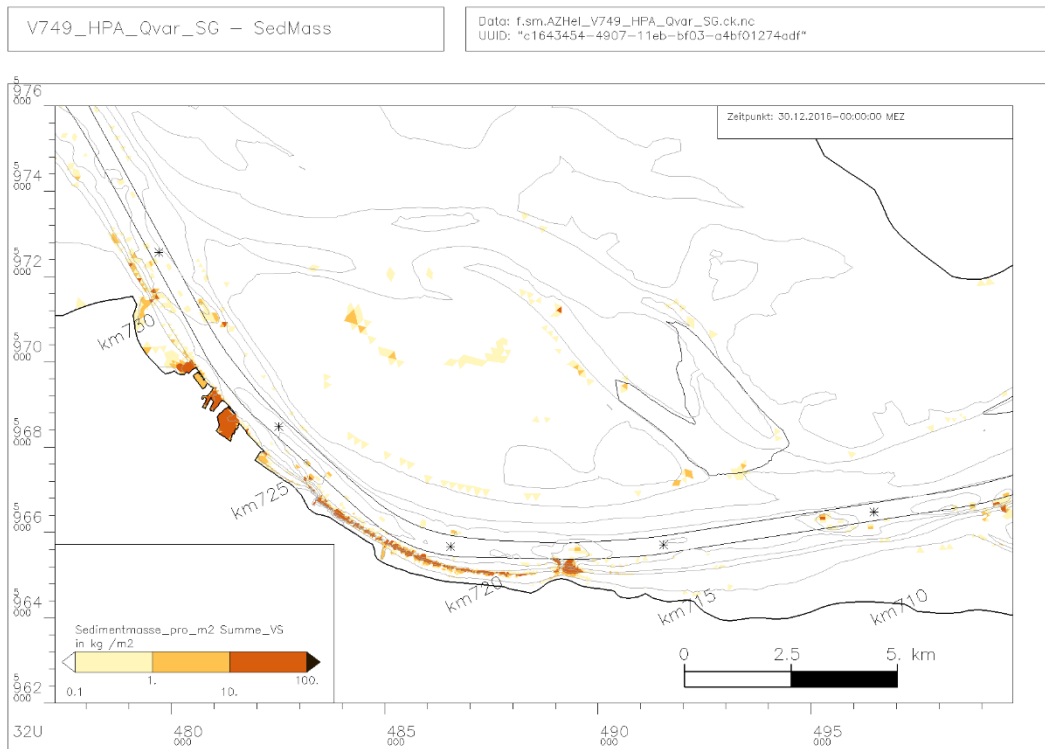


Bild 41: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Medem“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

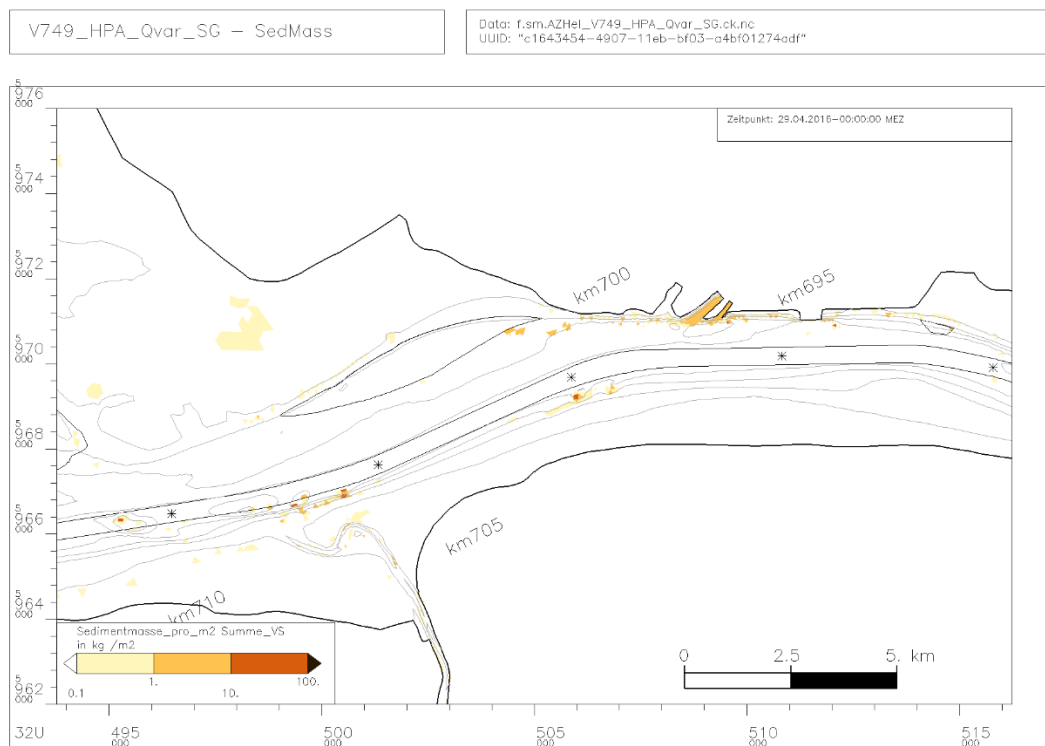


Bild 42: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 1 Monat Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

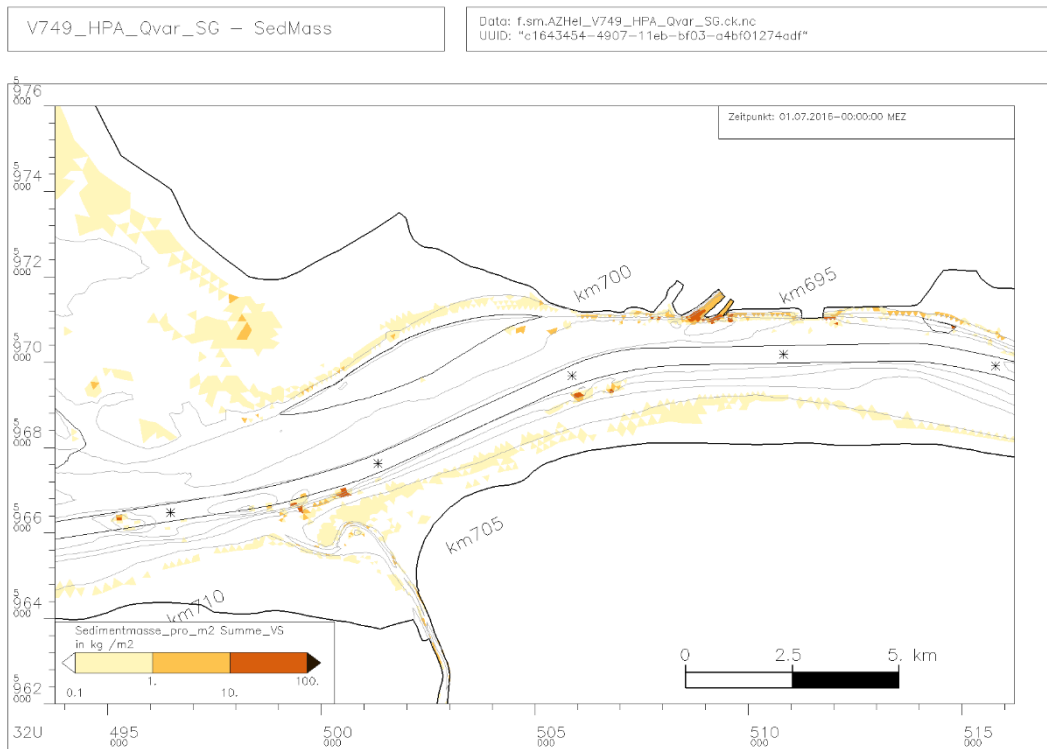


Bild 43: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 3 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

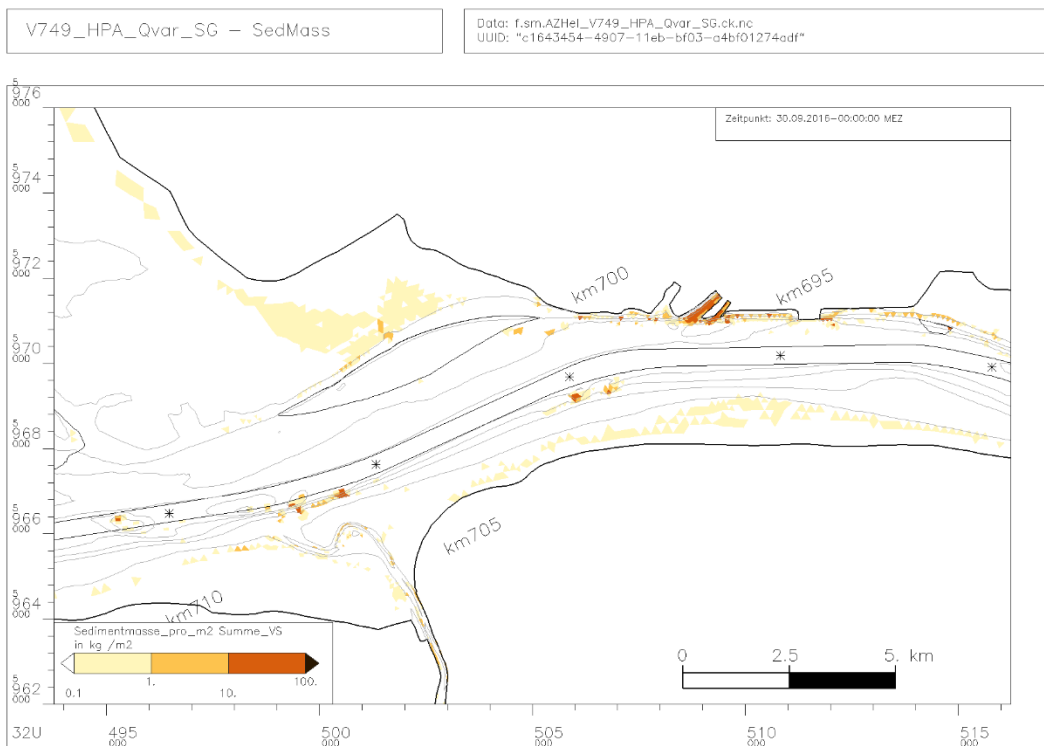


Bild 44: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 6 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

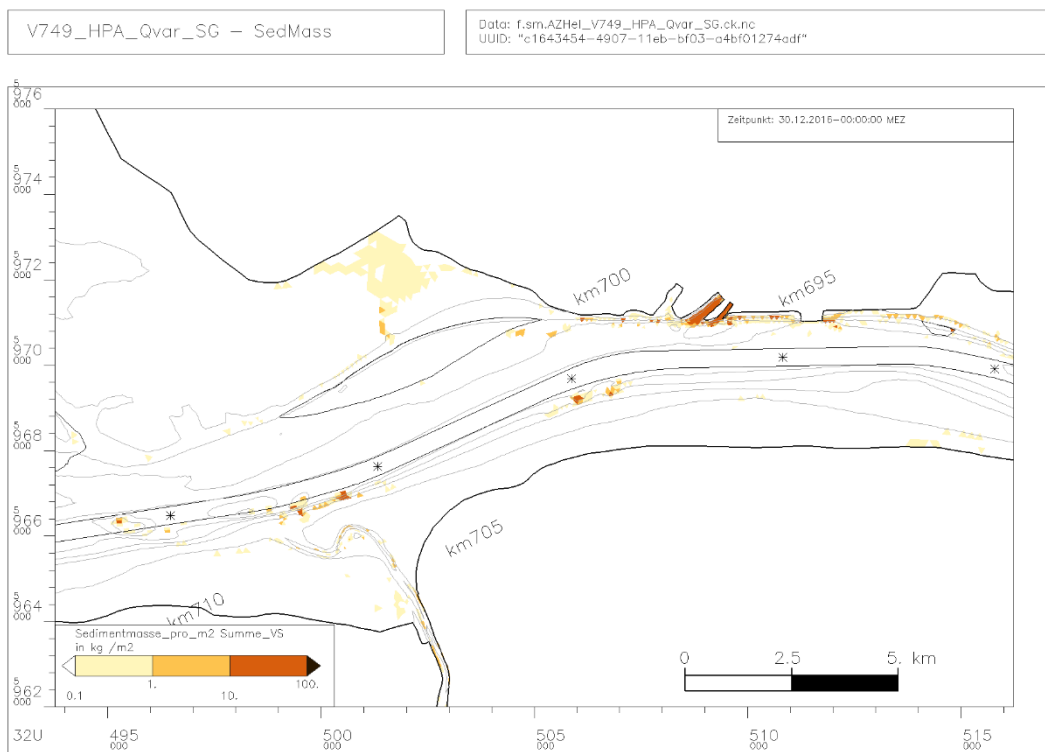


Bild 45: Sedimentmasse am Boden als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ nach 9 Monaten Simulationszeit aus dem Lauf V749_HPA_Qvar_SG

9.3.2 Schwebstoffgehalte

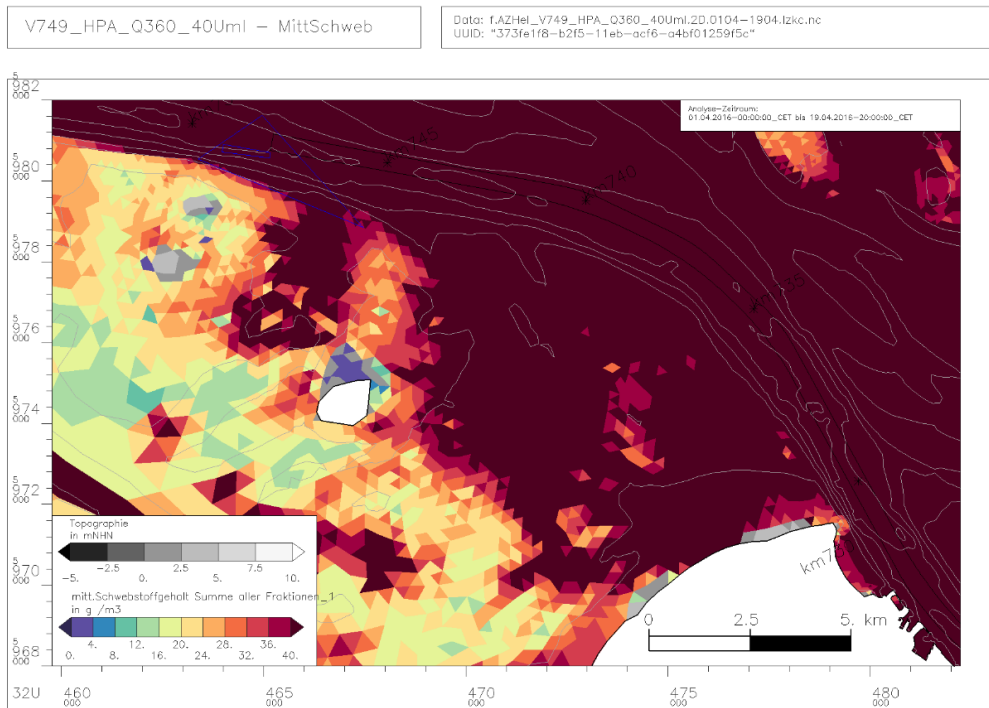


Bild 46: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

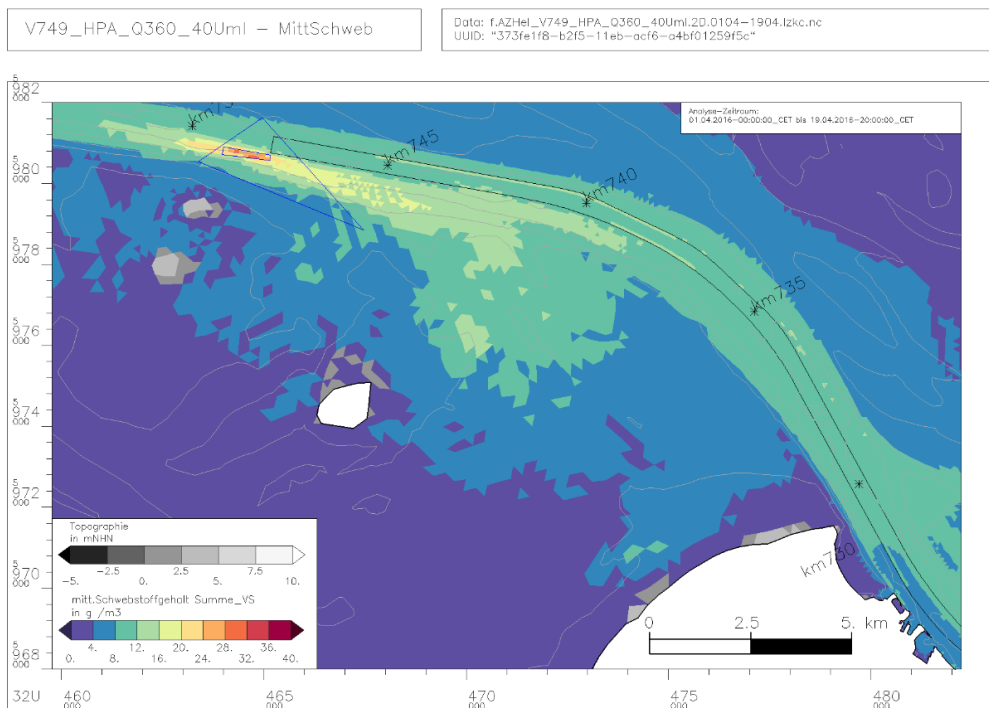


Bild 47: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fraktionen im Teilgebiet „Cux Watt“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

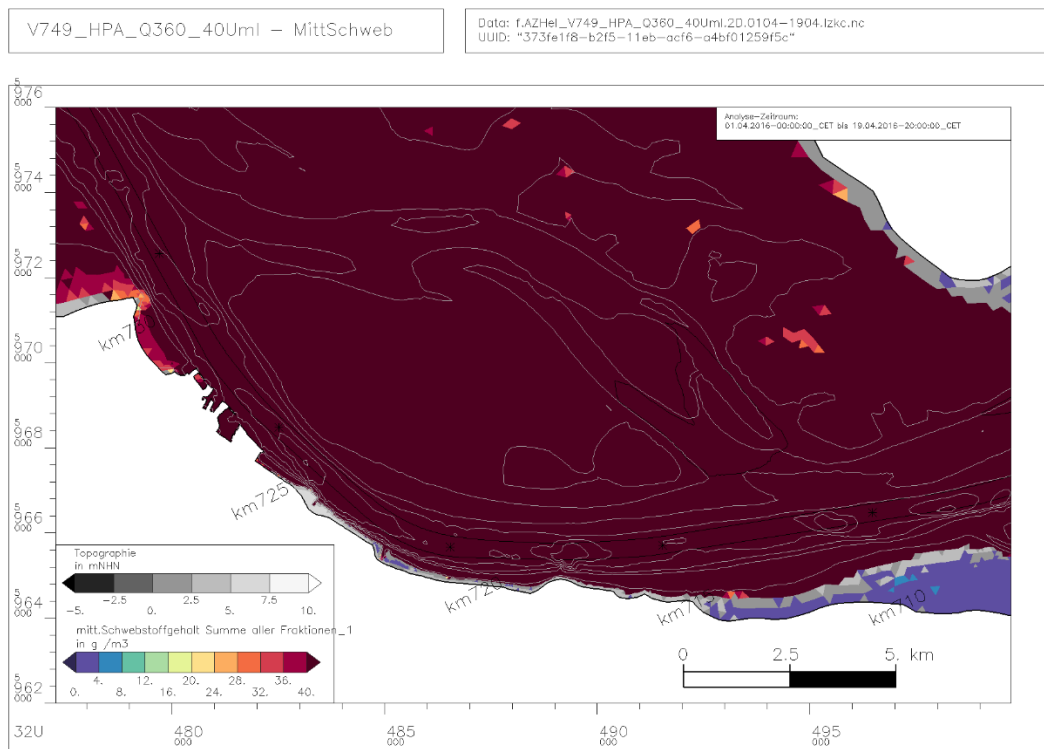


Bild 48: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

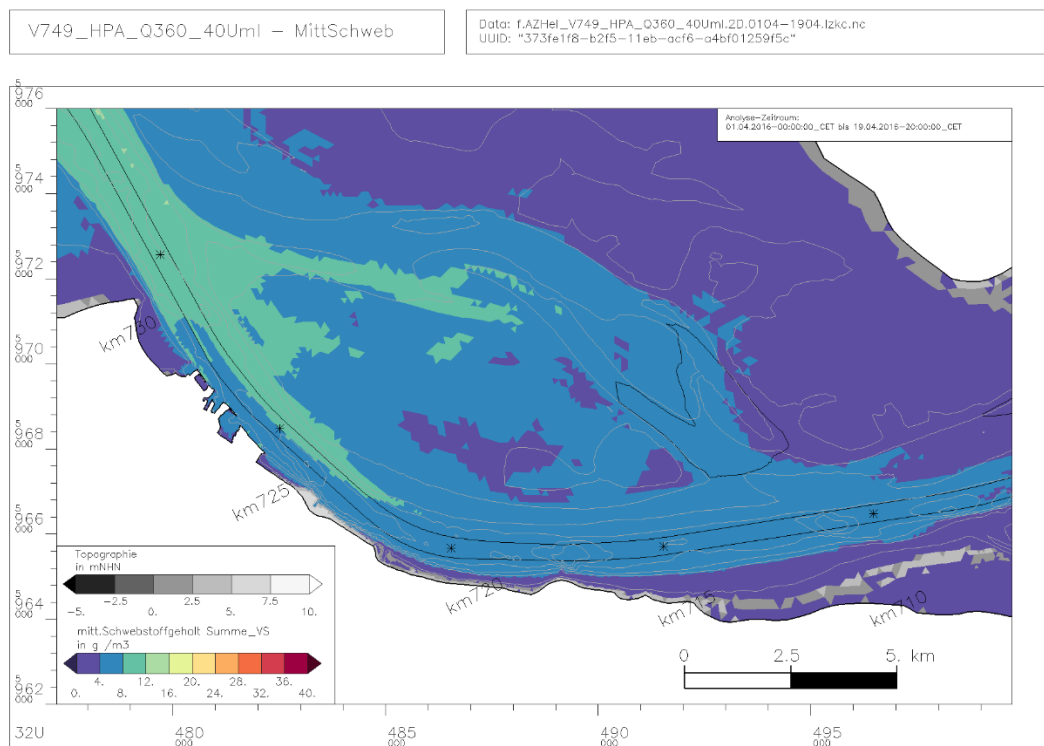


Bild 49: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggerygut-Fraktionen im Teilgebiet „Medem“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

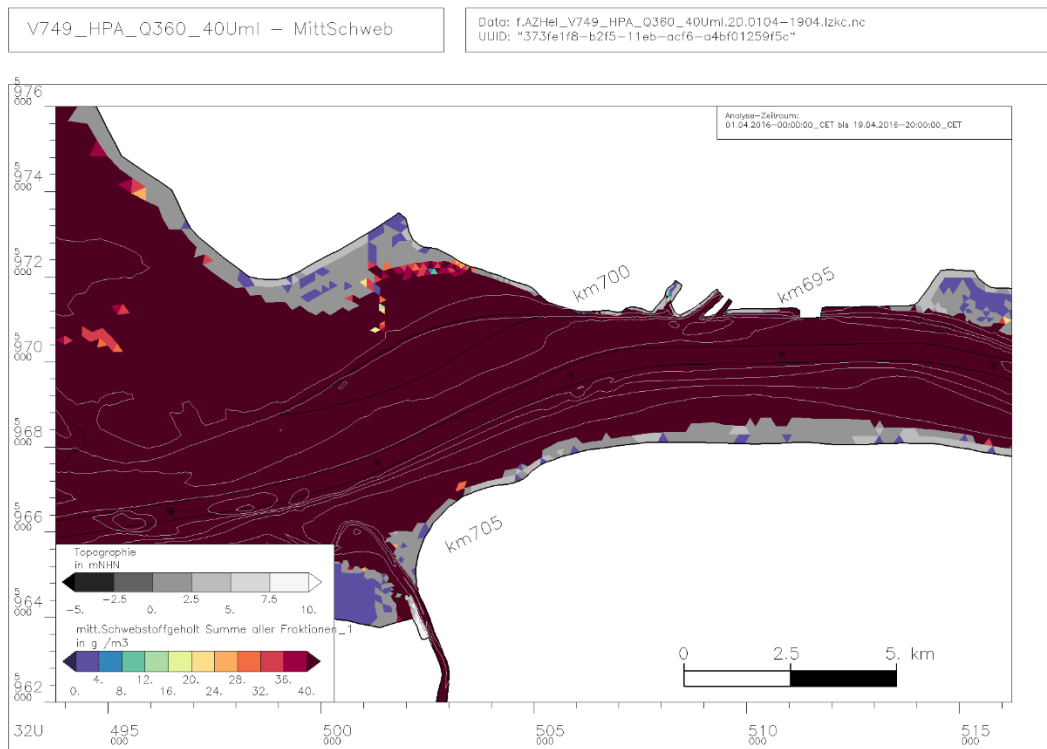


Bild 50: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe aller Fraktionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml

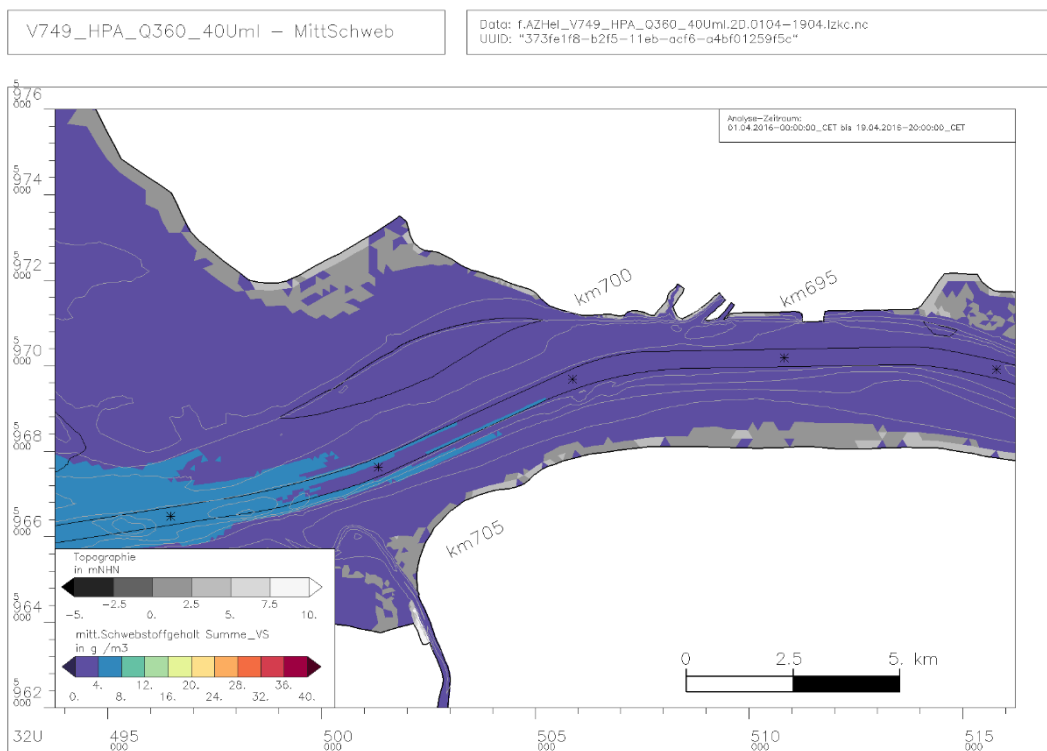


Bild 51: Mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittelwert über alle Tiden) als Summe der Baggergut-Fractionen im Teilgebiet „Brunsbüttel“ im Zeitraum snz07 im Lauf V749_HPA_Q360_40Uml



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

www.baw.de

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373