

Analyse der hydrologischen und morphologischen Entwicklung in der Tideelbe für den Zeitraum von 2013 bis 2018

Holger Weilbeer¹, Axel Winterscheid², Thomas Strotmann³, Ingo Entelmann⁴, Suleman Shaikh³ und Bernd Vaessen⁴

¹ Bundesanstalt für Wasserbau, holger.weilbeer@baw.de

² Bundesanstalt für Gewässerkunde

³ Hamburg Port Authority

⁴ Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee

Zusammenfassung

In den Jahren von 2013 bis 2018 gab es in der Tideelbe verschiedene auffällige hydrologische und morphologische Veränderungen. Im Hamburger Hafen aber auch im Fahrrinnenabschnitt von Wedel bis Juellssand sowie in den Nebenbereichen und Häfen entlang der Tideelbe stiegen die Unterhaltungsbaggermengen an feinkörnigen Sedimenten ungewöhnlich stark an. Beobachtet wurden zudem deutlich erhöhte Sedimentationsraten sowie in einzelnen Gewässerbereichen ein Wandel im Sedimentinventar, verbunden mit einer Glättung morphologischer Sohlstrukturen. Gleichzeitig waren Veränderungen im Wasserstands- und Strömungsgeschehen auffällig. Der Tidehub stieg insbesondere im inneren Ästuar ungewöhnlich stark an und die Messstationen registrierten einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten und eine Erhöhung der Trübung. Für die beschriebenen Veränderungen im Tideelbesystem sind nach derzeitigen Erkenntnissen morphologische Veränderungen – insbesondere im Mündungstrichter – ursächlich, die durch die Folgen der seit Sommer 2013 anhaltenden Phase unterdurchschnittlich niedriger Oberwasserzuflüsse überlagert und durch ein auf diese Entwicklung unzureichend angepasstes Sedimentmanagement verstärkt werden. Wie sich die Verhältnisse in der Tideelbe nach Ende der aktuellen Niedrigwasserphase entwickeln, ist in den kommenden Jahren genau zu beobachten. Gleichzeitig sind die organisatorischen und politischen Rahmenbedingungen für ein adaptives und flexibles Sedimentmanagement zu verbessern.

Schlagwörter

Tideelbe, Tidehub, Oberwasserzufluss, Schwebstoffgehalt, Unterhaltungsbaggermengen

Summary

During the period 2013–2018, several striking hydrological and morphological changes took place in the tidal Elbe. Significant increases of maintenance dredging quantities for fine grained sediments occurred in the Port of Hamburg, in fairway sections between Wedel and Juellssand as well as in the ancillary areas and ports along the tidal Elbe. Comparably, sedimentation rates have also increased. In some sections, a strong fining of sediments in combination with a smoothing of the river bed could be observed.

Simultaneously, changes in water levels and currents were noticeable. The amplification of the tidal range was unusually large especially in the inner estuary, where measuring stations registered an increase in flow velocities and higher levels of turbidity. Morphological changes, especially in the outer part of the estuary, are considered as responsible for the described changes in the tidal Elbe system. These changes are superimposed by the consequences of an inflowing discharge of fresh water, which remained below-average since summer 2013, and are very likely to be amplified by a sediment management scheme not adapted to these recent developments. Conditions in the tidal Elbe need to be observed during the upcoming years beyond the current period of low fresh water discharge. At the same time, the organizational and political framework for adaptive and flexible sediment management should be improved.

Keywords

Elbe, tidal river, tidal water level, fresh water inflow, suspended sediment concentration, maintenance dredging

1 Einleitung

Im Bereich der Tideelbe sind die Jahre seit 2013 durch eine äußerst angespannte Unterhaltungssituation geprägt. Insbesondere im Hamburger Hafen, aber auch im Fahrrinnenabschnitt von Wedel bis Juellssand sowie in den Nebenbereichen und Häfen entlang der Tideelbe, stiegen die Unterhaltungsbaggermengen an feinkörnigem Baggergut ungewöhnlich stark an. Beobachtet wurden zudem deutlich erhöhte Sedimentationsraten sowie in einzelnen Gewässerbereichen ein Wandel im Sedimentinventar, verbunden mit einer Glättung morphologischer Sohlstrukturen. Gleichzeitig waren Veränderungen im Wasserstands- und Strömungsgeschehen auffällig.

Dies war der Anlass eine gewässerkundliche Analyse der beobachteten Veränderungen vorzunehmen. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern der Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung (WSV), der Hamburg Port Authority (HPA), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), nahm dazu 2017 die Arbeit auf. Dabei wurde nicht nur der aktuelle hydrologische und morphologische Zustand der Tideelbe mitsamt der seit 2013 eingetretenen Veränderungen dokumentiert, sondern auch ein gemeinsamer, institutionsübergreifender Beitrag zur Weiterentwicklung des Prozess- und Systemverständnisses und der fachlichen Grundlagen für das Sedimentmanagement geleistet. Für eine Vielzahl der nachfolgend dargestellten Ergebnisse konnten im Rahmen dieser Arbeitsgruppe erstmals auch revierübergreifende und vereinheitlichte Auswertungen durchgeführt werden, was den Gedanken einer Betrachtung der Tideelbe als ein naturräumliches Gesamtsystem unterstreicht.

Die Arbeit der AG Sedimentmanagement wurde mit einem gewässerkundlichen Bericht dokumentiert (Entelmann et al. 2018). Der vorliegende Beitrag wurde aus diesem Bericht entwickelt und mit aktuellen Daten und Erkenntnissen ergänzt. Er ist folgendermaßen strukturiert:

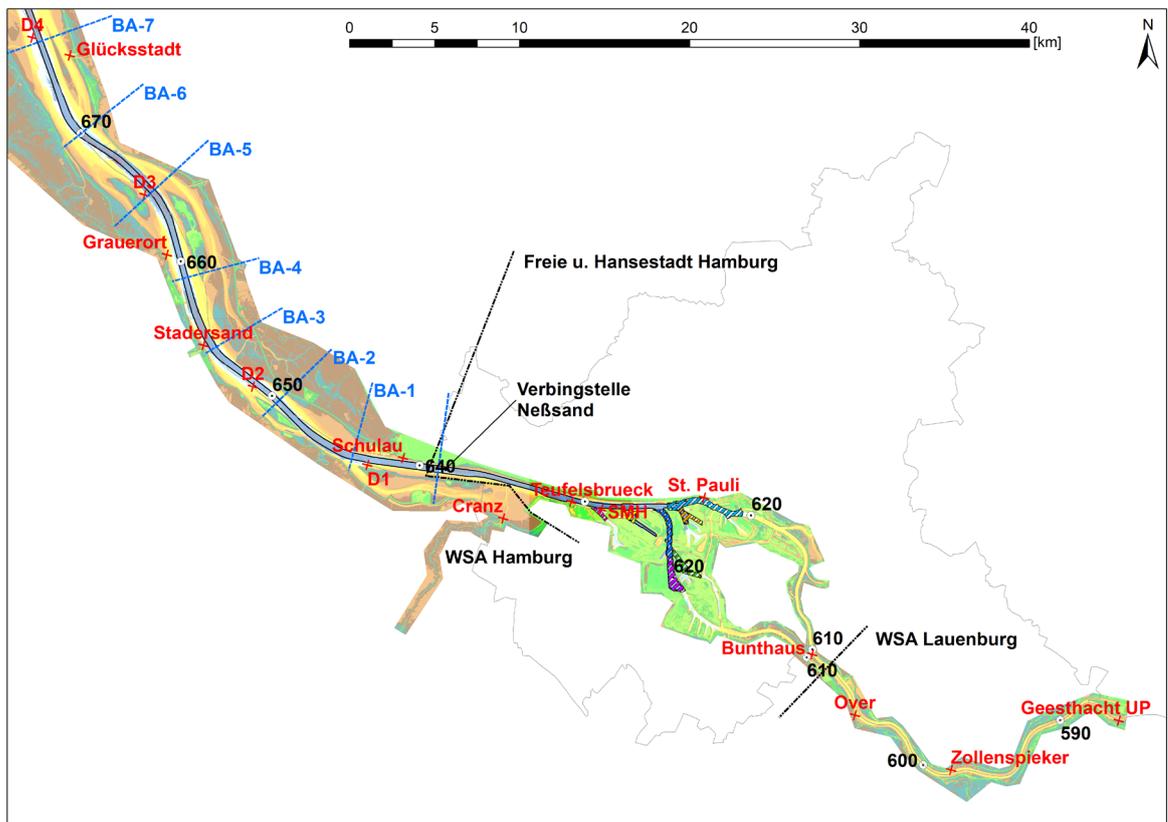
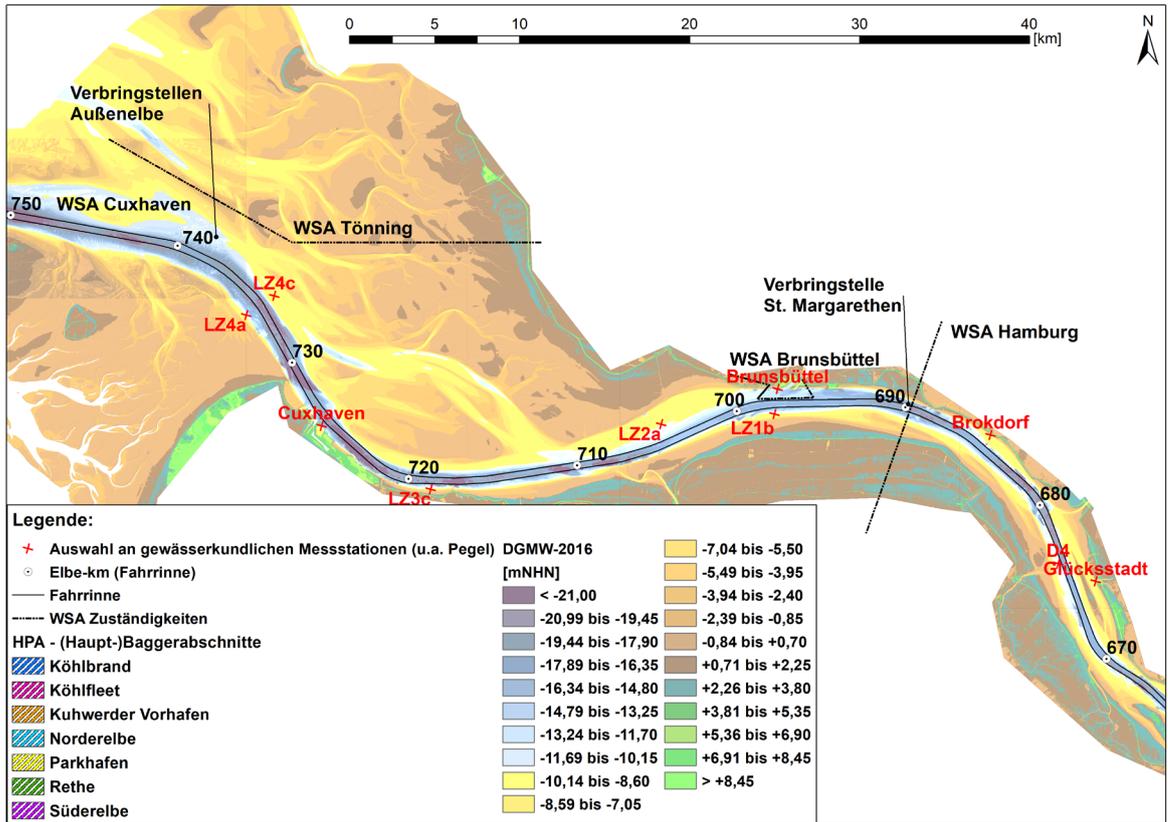


Abbildung 1: Übersicht der betrachteten gewässerkundlichen Messstationen in der Tideelbe sowie WSV-Baggerabschnitte, Hamburger Hauptbaggerabschnitte und behördlichen Zuständigkeitsgrenzen (Stand 2019). Die Höhen- und Tiefenangaben basieren auf dem DGM-W 2016.

In Kapitel 2 werden die in der Tideelbe beobachteten hydrologischen, hydrodynamischen und morphologischen Veränderungen der letzten Jahre aufgezeigt und zu den Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte in Beziehung gesetzt. Dabei werden zunächst gemessene hydrologische Größen wie der Oberwasserzufluss (Kapitel 2.1), die Tidewasserstände (Kapitel 2.2) und die Strömungsgeschwindigkeiten (Kapitel 2.3) ausgewertet. Die sprunghaften Veränderungen der Trübungsverhältnisse bzw. Schwebstoffgehalte (Kapitel 2.4) geben weitere Hinweise zur Entwicklung der Baggergutmengen (Kapitel 2.5) und der Sedimentationsraten (Kapitel 2.7). Darüber hinaus werden in Kapitel 2.6 unter Verwendung digitaler Geländemodelle morphologische Veränderungen zwischen den Jahren 2010 und 2016 dargestellt. Die dabei aufkommenden Fragen nach dem Einfluss der Topographie im Mündungsgebiet oder einer Glättung von Sohlstrukturen im Bereich Hamburg auf die Tidedynamik werden in Kapitel 3 mit Hilfe wasserbaulicher Modellstudien beantwortet. Weitere Wirkzusammenhänge, welche die Baggergutmengen in Hamburg beeinflussen, werden durch die Anwendung eines Datenmodells (Kapitel 4) identifiziert und quantifiziert. Nach einer Zusammenfassung der beobachteten Veränderungen und Systemstudien in Kapitel 5 werden schließlich die beobachteten Veränderungen erklärt (Kapitel 6) und Handlungsempfehlungen formuliert (Kapitel 7).

Abbildung 1 gibt eine Übersicht über die betrachteten gewässerkundlichen Messstationen sowie die Baggerabschnitte der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, die Hamburger Hauptbaggerabschnitte und behördlichen Zuständigkeitsgrenzen. Die eingezeichneten Pfeile weisen auf die derzeitigen Umlagerungsbereiche für Baggergut. Wichtigste im weiteren genannte Verbringstellen sind der Bereich Neßsand (Elbe-km 638) an der Hamburger Landesgrenze (Verbringung von HPA-Baggergut), das Gebiet St. Margarethen (Elbe-km 686 bis 690) zwischen Störbogen und Brunsbüttel (Hauptverbringstelle für WSV-Baggergut aus den Sedimentationsbereichen Wedel bis Juellssand nahe Hamburg) sowie der Neuer Luechtergrund im Mündungstrichter (Elbe-km 730 bis 740). Weitergehende Informationen zu den Umlagerungsbereichen sowie Kartendarstellungen finden sich unter anderem in BfG (2014).

2 Beobachtete Veränderungen

2.1 Oberwasserzufluss in die Tideelbe

Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ von 4070 m³/s am 13.06.2013, bewegt sich der Oberwasserzufluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr niedrigen Niveau. Abbildung 2 zeigt die mittleren Jahresabflüsse am Pegel Neu Darchau von 1987 bis 2019 im Vergleich zum rückblickenden 30-jährigen Mittelwert MQ30. Der Mittelwert dieser für klimatologische Betrachtungen repräsentativen Periode lag bis einschließlich 2013 noch bei knapp 700 m³/s. Durch die um durchschnittlich 200 m³/s geringere Abflussmenge der vergangenen sechs Abflussjahre liegt das aktuelle MQ30 mittlerweile nur noch bei 649 m³/s. Die Abbildung 2 zeigt, dass auch in der Vergangenheit bereits mehrjährige Niedrigwasserperioden aufgetreten sind. Bereits in den Jahren 1989 bis 1993 gab es in fünf aufeinanderfolgenden Jahren Minderabflüsse, die zu einem MQ5 von nur 478 m³/s führten. Weitere hier nicht dargestellte Perioden mit länger anhaltender Trockenheit im Einzugsgebiet der Elbe gab es in der Vergangenheit auch schon von

1949 bis 1952 (MQ4 = 517 m³/s) sowie von 1971 bis 1974 (MQ4 = 542 m³/s) und von Juni 1982 bis Dez. 1985 (MQ3½ = 552 m³/s).

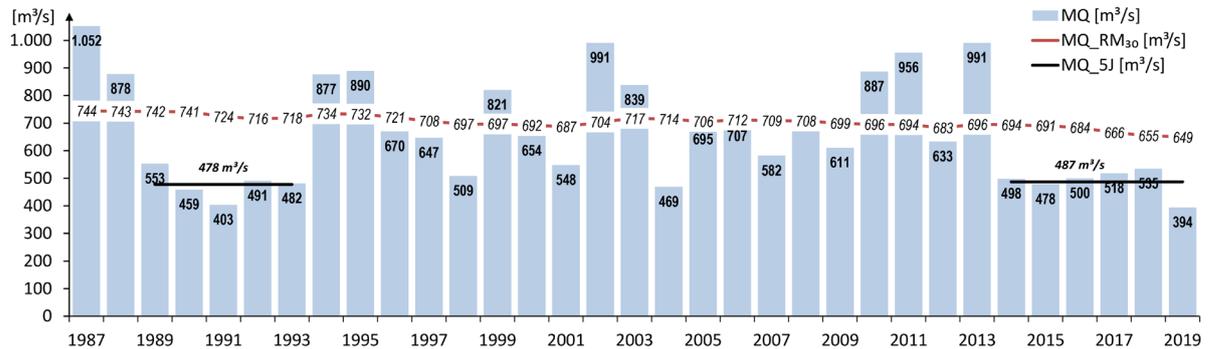


Abbildung 2: Mittlerer Abfluss Neu Darchau in [m³/s] 1987–2019 (Gewässerkundliche Jahre vom 01.11. bis 31.10.).

Die geringen Abflüsse der vergangenen Jahre traten sowohl in den Sommer- wie auch in den Wintermonaten auf. Abbildung 3 zeigt die mittleren Abflussmengen jeweils differenziert für die Zeitspannen November bis April in grün (Zeitraum mit den größten Oberwasserzuflüssen eines Jahres, in denen die HPA bis Ende März den größten Teil ihrer Unterhaltungsbaggermengen bei Neßsand umlagert) und Mai bis Oktober in orange.

Während das MQ^{WI} (mittlerer Abfluss im Winterhalbjahr November–April) im langzeitstatistischen Mittel bis zum Jahr 2013 867 m³/s betrug, lagen die Abflussmengen in den letzten 6 Jahren lediglich bei 536 m³/s (2018/19) bis 833 m³/s (2017/18). Die ebenfalls zu trockenen Sommermonate erreichten mit 240 m³/s als Mittelwert für die Monate Mai bis Oktober 2018 rd. 44 % des langzeitstatistischen Mittelwertes (MQ^{SO} = 547 m³/s) und unterboten damit das bisherige Sommer-Abflussminimum aus dem Jahr 1976 (280 m³/s).

Der maximale Tageswert in den vergangenen 6 Jahren lag bei 1360 m³/s am 20.01.2015. Seit Mitte Juli 2013 konnte lediglich durchschnittlich 14 Tagen pro Jahr ein Abfluss größer 1.000 m³/s registriert werden. Im 30-jährigen Mittel bis zum Juni-Hochwasser 2013 wurde dieser Wert in der Regel an knapp 70 Tagen pro Jahr überschritten. Dagegen hat sich die Anzahl der Tage mit extrem niedrigen Abflusswerten <200 m³/s für diese Periode auf 195 summiert. In den 30 Jahren zuvor wurden derart niedrige Abflussmengen nur an insgesamt 50 Tagen beobachtet.

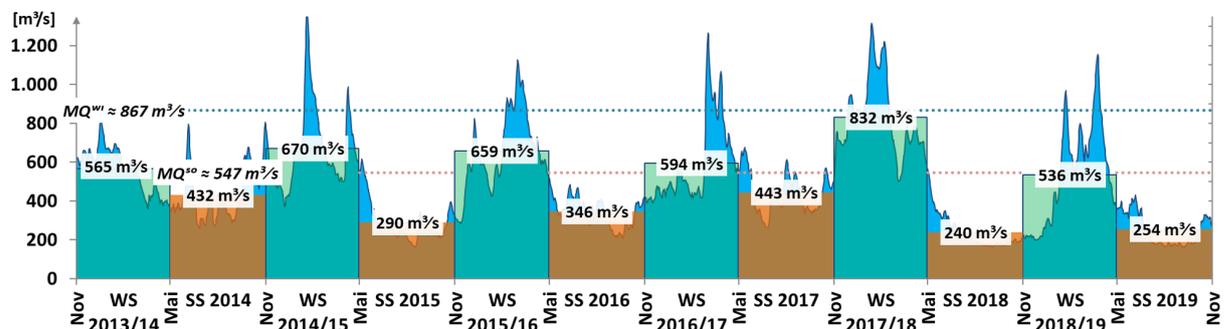


Abbildung 3: Oberwasserzufluss Neu Darchau seit Juli 2013 in der abflussreichsten Jahreszeit (grün hinterlegt) und in den Sommermonaten (orange hinterlegt).

2.2 Tidewasserstände

2.2.1 Entwicklung des Tidehubs

An den Pegeln der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Wehr bei Geesthacht wird seit Jahrzehnten tendenziell ein Anstieg des Tidehubs registriert. Während der Tidehub in Hamburg in den ersten 10 Jahren nach Fertigstellung der Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe (1999) mit durchschnittlich rd. 0,75 cm/a etwa in der gleichen Geschwindigkeit wie vor dem Ausbau anstieg, hat sich der jährliche Anstieg des Tidehubs, gemessen am Pegel St. Pauli, zwischen 2011/12 bis 2017 um den Faktor 4 auf 2,8 cm/a beschleunigt (Abbildung 4). Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder.

Bemerkenswert ist eine vergleichbare Entwicklung des Tidehubs Anfang der 1990er Jahre, als sich ebenfalls während einer Niedrigwasserphase der Elbe von 1989 bis 1993 (Abbildung 2) über die Dauer von 5 Jahren der Tidehub in Hamburg um rund 10 cm erhöht hat. Hier zeigt sich erstmals eine Duplizität der Ereignisse. Dieser Umstand sorgte auch damals für Aufsehen und führte zu einer gemeinsamen Untersuchung der Gewässerkundler des WSA Hamburg und dem damaligen Amt Strom- und Hafenausbau Hamburg. Die Untersuchungen wurden in einer Studie zusammengefasst, die zu dem Ergebnis kam, dass „natürliche morphologische Umlagerungsvorgänge (...) an dieser Entwicklung (Anm.: der Tnw-Absenkung) wesentlich beteiligt waren. Hierbei handelt es sich um umfangreiche Umlagerungsvorgänge im Bereich Medemsand und Medemrinne, zwischen den Pegeln Cuxhaven und Osteriff (...)“ (Strom- und Hafenausbau Hamburg und WSA Hamburg 1996).

Eine tendenziell vergleichbare Entwicklung des Tidehubs, allerdings mit deutlich abnehmender Ausprägung Richtung Nordsee, ist auch an den Pegeln unterhalb Hamburgs zu beobachten, in Abbildung 5 in Relation zum Pegel Helgoland dargestellt. Die beobachteten Veränderungen im Tidehub sind etwa ab Brokdorf und weiter stromauf erkennbar. Schreibt man den im oberen Ästuar etwas niedrigeren Tidehub des Jahres 2013 den hydrologischen (erhöhter Oberwasserzufluss) und meteorologischen Randbedingungen (häufige Ostwindlagen) in diesem Jahr zu Gute, so lässt sich der Beginn des beschleunigten Tidehubanstiegs an den Pegeln unterhalb Hamburgs auf den Zeitraum 2011/12 datieren.

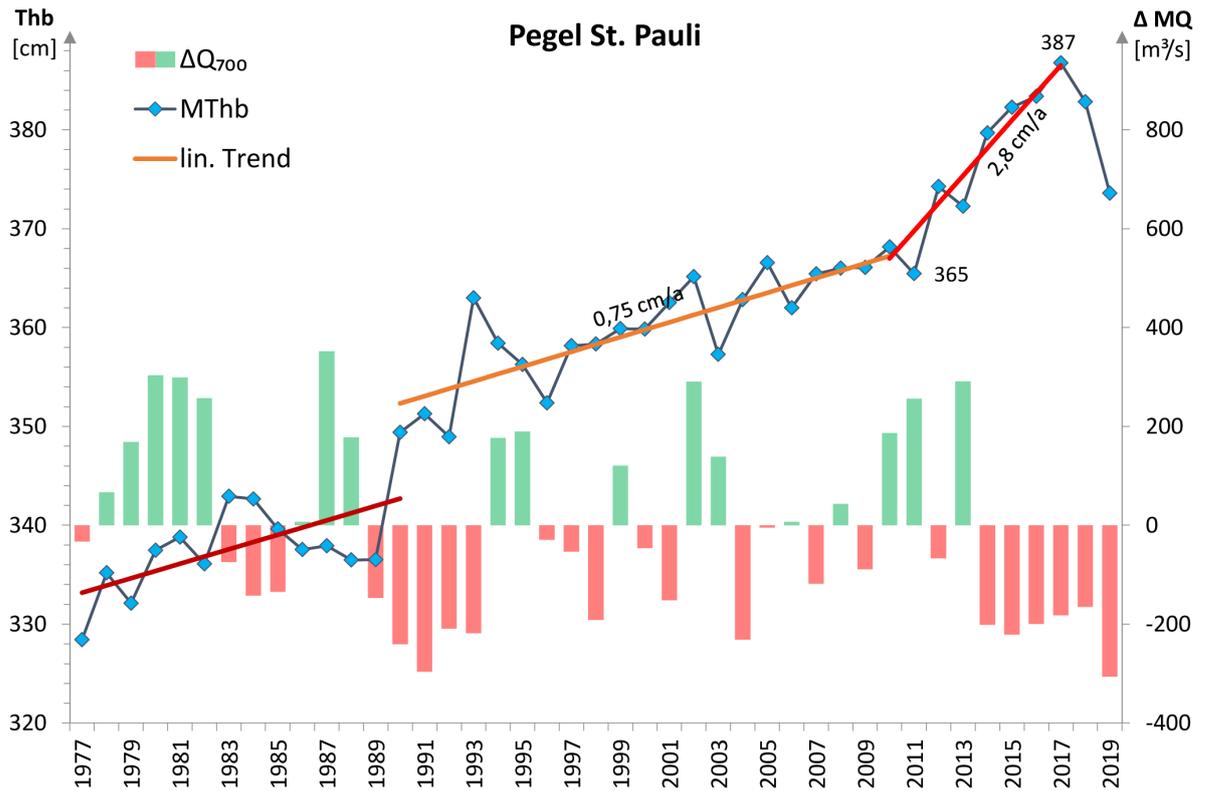


Abbildung 4: Entwicklung des Tidehubs am Pegel St. Pauli sowie Abweichungen des jährlichen mittleren Abflusses MQ1 am Pegel Neu Darchau vom langjährigen Mittelwert MQ30.

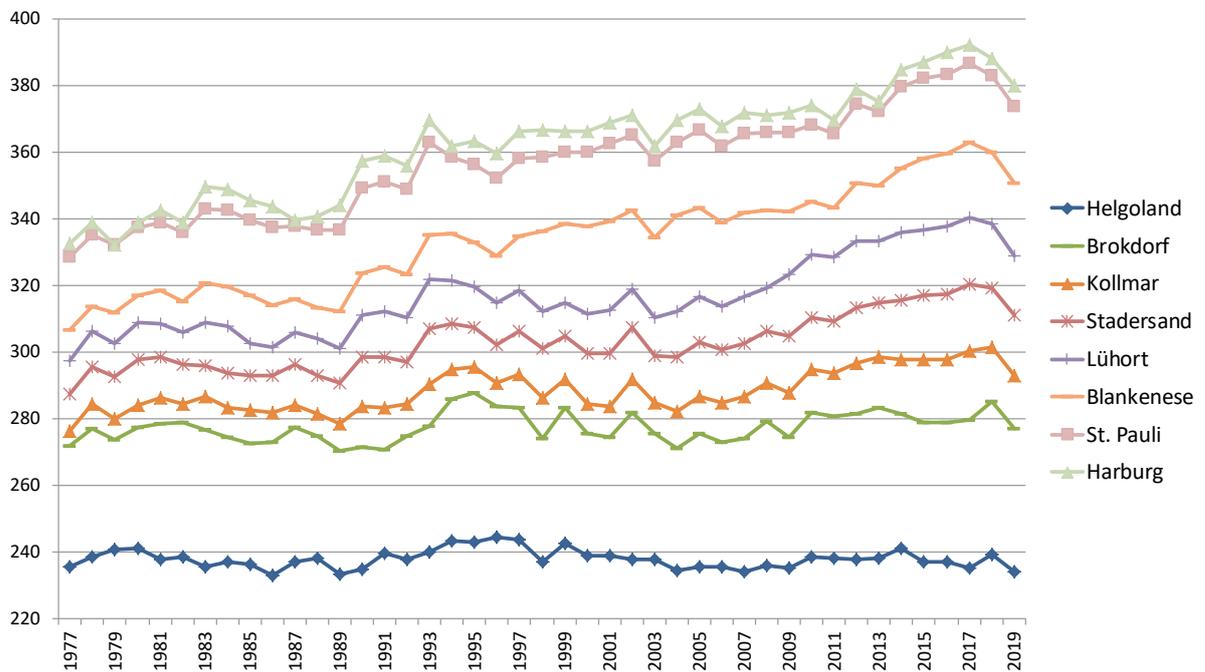


Abbildung 5: Tidehubentwicklung von Brokdorf bis Hamburg in Relation zum Pegel Helgoland.

Die Differenzen des 5-jährigen Mittels des Tidehubs (2013/2017) zum 10-Jahresmittel 2003/2012 (Referenz) an den Pegeln oberhalb des Pegels Brunsbüttel (Elbe-km 696) in Abbildung 6 verdeutlichen, dass die größten Veränderungen an den weiter stromauf gelegenen Pegeln zwischen Hetlingen (Elbe-km 651) und St. Pauli (Elbe-km 623) aufgetreten

sind. Gegenüber dem Referenzzeitraum ist der MThb (5-Jahresmittel 2013/2017) um 12 cm am Pegel Stadersand (Elbe-km 655) und ca. 16 cm an den Pegeln Schulau (Elbe-km 640) und St. Pauli gestiegen, während er am Pegel Helgoland in diesen Zeiträumen nahezu identisch war.

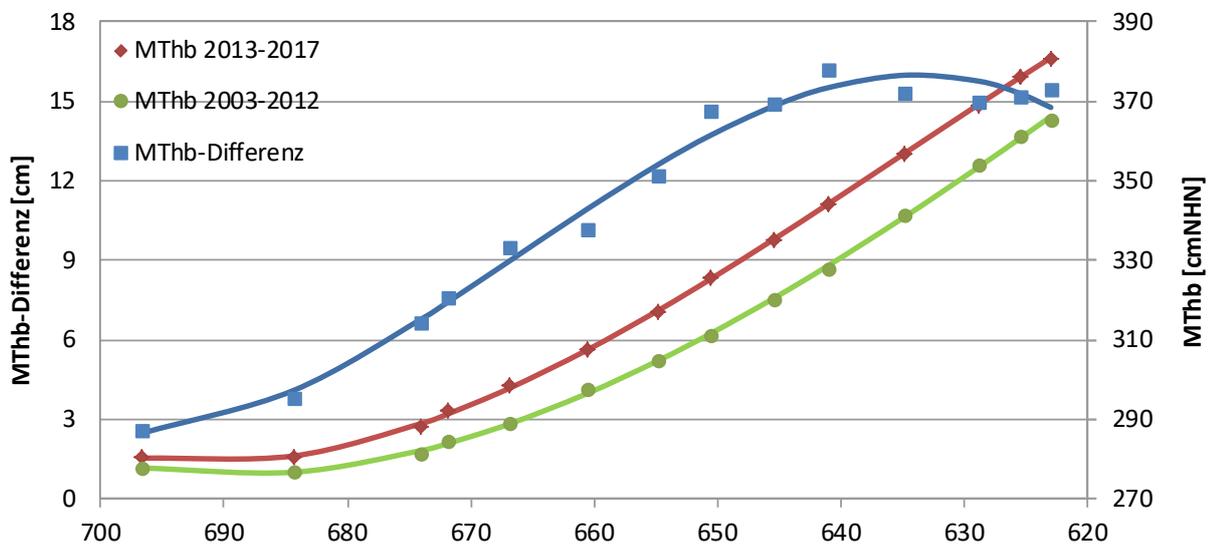


Abbildung 6: Anstieg des MThb 2013-2017 gegenüber dem MThb 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

2.2.2 Entwicklung des Tideniedrigwassers

Auch die Entwicklung des Tideniedrigwassers zeigt die größten Veränderungen an den weiter stromauf gelegenen Pegeln Schulau (Elbe-km 640) bis St. Pauli (Elbe-km 623) (Abbildung 7). Die Differenz zum Pegel Helgoland steigt in diesen Jahren um 10–15 cm an. In dem Jahr 2018 steigt das Tideniedrigwasser jedoch wieder deutlich an und verbleibt 2019 im Vergleich zum Pegel Helgoland auf dem erreichten Niveau.

Gegenüber dem 10-Jahresmittel 2003/2012 ist das MTnw 2013/2017 (5-Jahresmittel) um 8 cm am Pegel Stadersand (Elbe-km 655), 10 cm am Pegel Schulau (Elbe-km 640) und 12 cm am Pegel St. Pauli (Elbe-km 623) gefallen, während es am Pegel Helgoland und Brokdorf in diesen Zeiträumen nahezu unverändert war (Abbildung 8).

Das im Vergleich zum Referenzzeitraum deutlich niedrigere Oberwasser im 5-jährigen Vergleichszeitraum (2013–2017) hat unterhalb der Elbbrücken aufgrund der Querschnittsaufweitung nur noch geringen Einfluss auf die Tidewasserstände. Im Raum Hamburg kann das gegenüber dem langzeitstatistischen Mittel um rd. 200 m³/s geringere Oberwasser dennoch für etwa 3 bis 4 cm (25–30 %) der MTnw-Absenkung verantwortlich gemacht werden. Oberhalb der Elbbrücken (hier nicht dargestellt) ist der Einfluss jedoch deutlich größer, was bei den Pegeln Bunthaus (–15 cm), Over (–19 cm), Zollenspieker (–26 cm) und Geesthacht (–29 cm) zu einer deutlich stärkeren Absenkung des MTnw geführt hat.

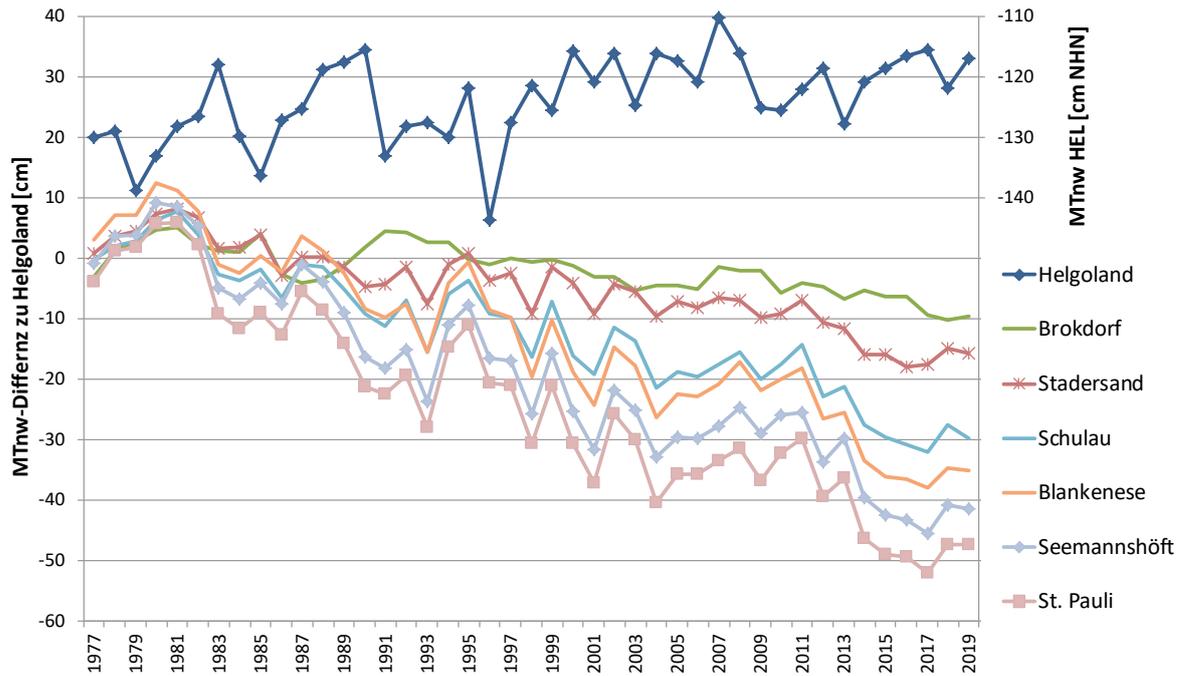


Abbildung 7: Entwicklung des Tideniedrigwassers zwischen Brokdorf und Hamburg als Differenz zum Pegel Helgoland.

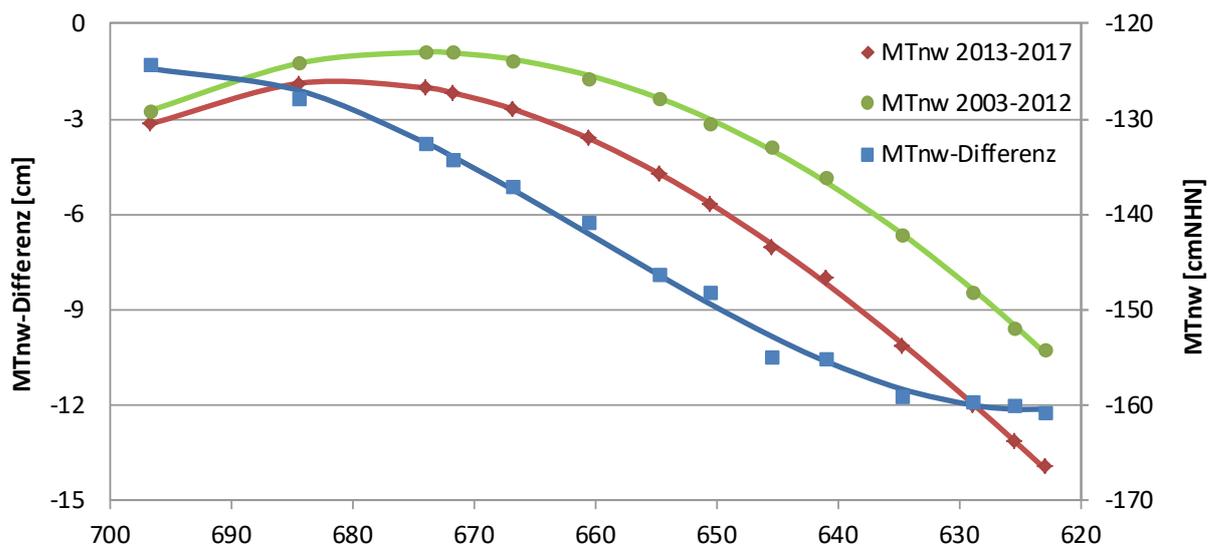


Abbildung 8: Absenkung des MTnw 2013-2017 gegenüber dem MTnw 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

2.2.3 Entwicklung des Tidehochwassers

Die Entwicklung des Tidehochwassers an den Pegeln zwischen Brokdorf und Hamburg ist im Vergleich zur Tideniedrigwasserentwicklung deutlich schwächer ausgeprägt. Die Abbildung 9 zeigt das mittlere Tidehochwasser als Differenz zum Pegel Helgoland. In Brokdorf ist in den Jahren ab 2013 ein schwacher Abwärtstrend zu beobachten, an den Pegeln weiter oberhalb zwischen Stadersand und Schulau ist hingegen eine schwache Zunahme zu erkennen, während die Hamburger Pegel kaum einen Trend zeigen.

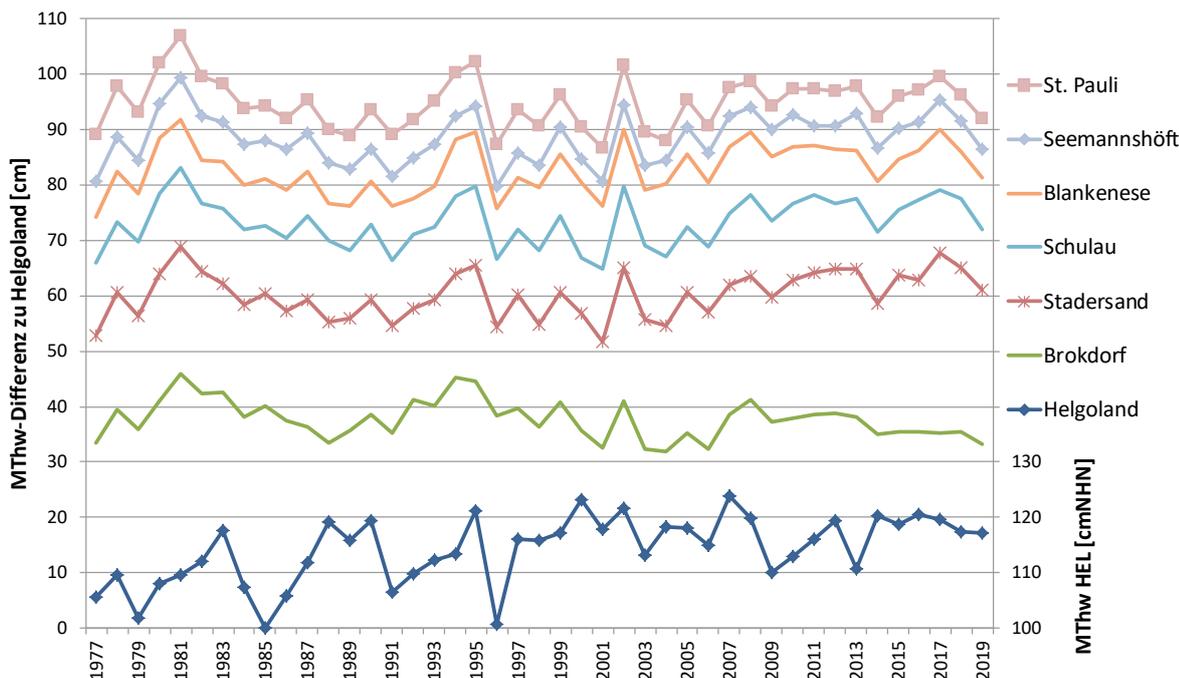


Abbildung 9: Entwicklung des Tidehochwassers zwischen Brokdorf und Hamburg als Differenz zum Pegel Helgoland.

Bei Betrachtung der lokalen absoluten Werte liegt der Anstieg des mittleren Tidehochwassers in den Jahren von 2013 bis 2017 gegenüber dem MThw 2003-2012 maximal bei rd. +4,5 cm an den Pegeln Hetlingen (Elbe-km 651) sowie Lühort (Elbe-km 649) und nimmt in Richtung Hamburg bis St. Pauli um etwa 1 cm wieder ab (Abbildung 10).

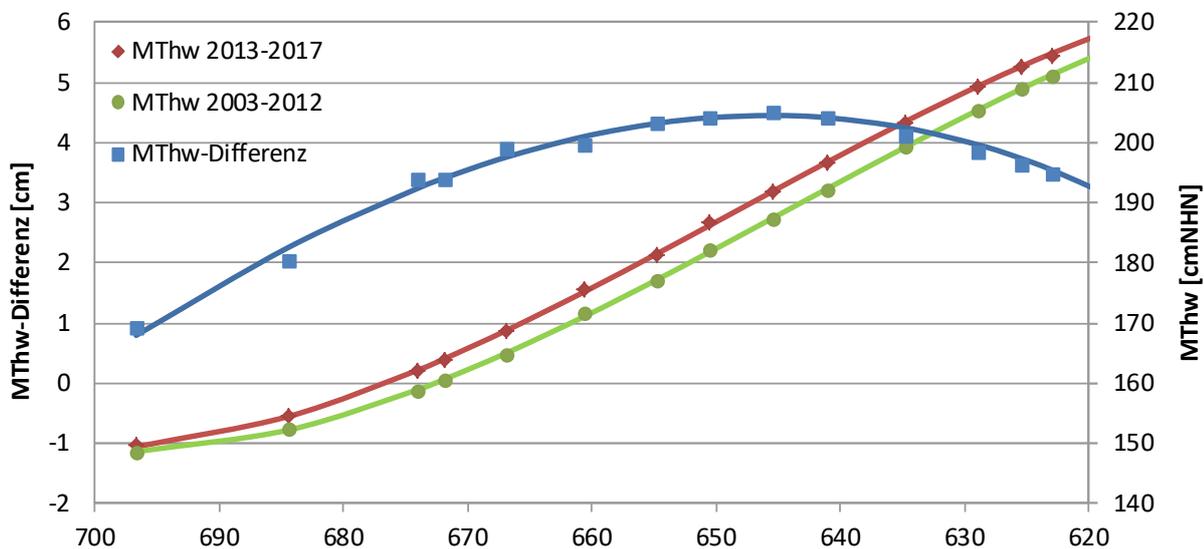


Abbildung 10: Anstieg des MThw 2013-2017 gegenüber dem MThw 2003-2012 von Brunsbüttel (Elbe-km 696) bis Hamburg (Elbe-km 623).

2.2.4 Externe Einflüsse auf die Ausprägung der Tidewasserstände

Die vorgenommene Betrachtung von relativen Änderungen der Tidewasserstände im inneren Ästuar im Vergleich zum Pegel Helgoland können dabei helfen, die in den absoluten

Werten beobachteten Veränderungen, in einem ersten Schritt zu objektivieren. Eine vollständige Neutralisierung der externen Einflüsse auf die Ausprägung der Tidewasserstände erfordert jedoch die Berücksichtigung weiterer Größen als den hier teilweise bereits angesprochenen Einfluss des Oberwassers.

Windrichtung und -geschwindigkeit

Der Wind über der Dt. Bucht ist die dominierende Einflussgröße für die Lage und Inklination des Ruhewasserspiegels zwischen Helgoland und Hamburg und bestimmt damit im Zusammenwirken mit dem Abfluss über das Wehr Geesthacht im Wesentlichen die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen für die Transformation der Tideenergie im Ästuar (Strotmann und Grothaus 2014).

In den früheren empirischen Modellen zur Übertragung der Tideparameter von der Nordsee in die Ästuar zur Quantifizierung ausbaubedingter Änderungen (z. B. Jensen et al. 2003) wird noch davon ausgegangen, dass sich der Windeinfluss bereits hinreichend in den Tidewasserständen am Pegel Helgoland abbildet und linear ins Ästuar übertragen werden kann. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass diese Ansätze die divergierende Wirkung auf- und ablandiger Winde auf die räumliche Zu- bzw. Abnahme der Hoch- und Niedrigwasserstände und damit die Tidehubänderung im Küstenvorfeld und Ästuar nicht zutreffend beschreiben (Grothaus 2013).

Dies vorausgeschickt zeigt die Jahres-Windstatistik der Station Helgoland des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in den vergangenen Jahren keine besonderen Auffälligkeiten. Die Windverhältnisse konnten weitestgehend als eher ‚ruhig‘ bezeichnet werden, was sich auch schon durch den relativ stabilen Verlauf der Hoch- und Niedrigwasserstände des Pegels Helgoland andeutete (Abbildung 7 und Abbildung 9).

In der Deutschen Bucht erhöhen Winde aus westlichen Richtungen die Tidewasserstände, Winde aus östlichen Richtungen verringern sie. Dieser Einfluss lässt sich für den Pegel Helgoland in guter Näherung quantifizieren, indem die Tidehalbwasser mit den quadrierten Windgeschwindigkeiten für 16 Windrichtungsklassen sowie der Druckanomalie an der Messstation Helgoland korreliert werden (Fickert und Strotmann 2009). Abbildung 11 zeigt für die Jahre von 2011 bis 2019 die resultierende positive (blau) oder negative (rot) Windschubwirkung auf die Wasserstände am Pegel Helgoland differenziert nach Windrichtung. Die Integration der vorzeichenbehafteten Fläche liefert die winderzeugte Abweichung des jährlichen Tidehalbwassers vom mehrjährigen statistischen Mittel ohne Windwirkung.

Die in Abbildung 7 und Abbildung 9 erkennbaren Ausreißer mit um ca. 8–10 cm geringeren Tidewasserständen sowohl beim MTnw als auch MThw am Pegel Helgoland im Jahr 2013 sind mit Hilfe der Abbildung 11 damit zu erklären, dass sich in diesem Jahr die Windschubkräfte aus östlichen und westlichen Richtungen nahezu die Waage gehalten haben, während sie üblicherweise aus westlichen Richtungen überwiegen (Abbildung 11).

Eine mit dem Jahr 2013 vergleichbar große „rote“ Fläche im Jahr 2018 hatte dagegen lediglich eine Erniedrigung des MTnw in ähnlicher Größenordnung wie 2013 zur Folge, während sich das MThw 2018 aufgrund der häufigeren und stärkeren westlichen Winde auf einem ähnlichen Niveau wie in den Vorjahren einstellte. Bei vergleichbaren Luftdruckbedingungen resultierten diese unterschiedlichen Windverhältnisse in einer Herabsetzung des Tidehalbwassers (hier nicht dargestellt) gegenüber dem langjährigen statistischen Mittel von –8 cm im Jahr 2013 und lediglich –1,7 cm im Jahr 2018.

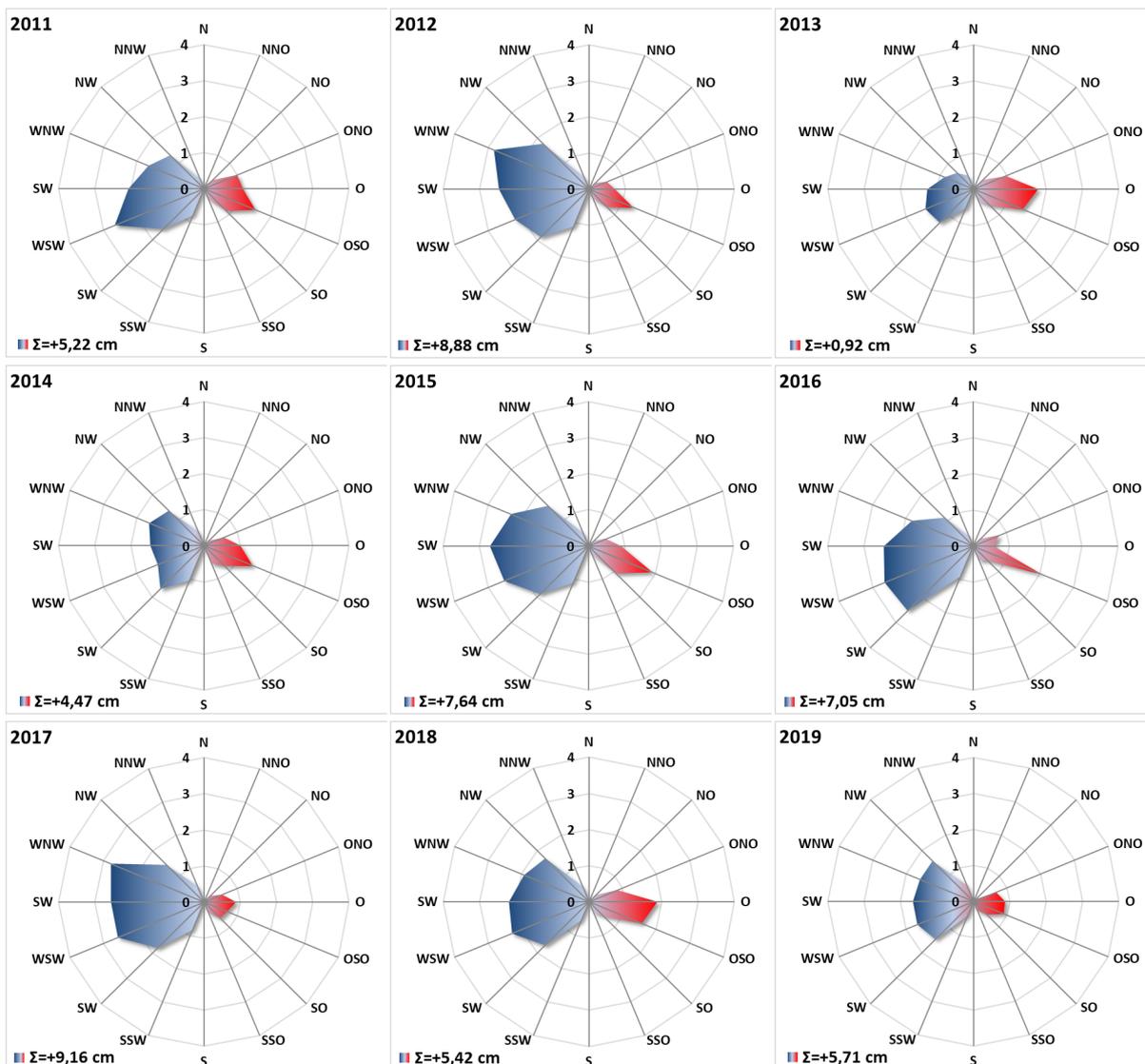


Abbildung 11: Richtungsdifferenzierte winderzeugte Tidehalbwasseranomalie der Jahre 2011–2019 für den Pegel Helgoland. Eine resultierende Erhöhung der Pegelwasserstände wird in Blautönen und eine Verringerung in Rottönen dargestellt.

Langperiodische Gezeiten-Variationen

Die Gezeiten im offenen Ozean ergeben sich im Wesentlichen als Folge der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne. Durch die Verbindung zum Nordatlantik werden die Schwingungen der Wassermassen des Atlantiks auf die Nordsee und von dort auf die Ästuar übertragen, weshalb sie auch als Mitschwinggezeiten bezeichnet werden.

Theoretisch lassen sich hunderte Partialtiden mit unterschiedlichen Perioden aus einer Aufzeichnung der örtlichen Wasserspiegelauslenkung analysieren. Den größten Anteil am beobachteten Tidehub hat hier die halbtägige Mondgezeit M2. In Kombination mit der deutlich geringeren halbtägigen Sonnengezeit S2 resultiert der bekannte Spring-Nipp-Zyklus, mit einem Minimum im Tidehub nach Halbmond und einem Maximum nach Voll- bzw. Neumond, wenn sich die Massenanziehungskräfte von Sonne und Mond addieren.

Die Einhüllende dieser Tidehubvariation, die als MSf-Gezeit bezeichnet wird, hat eine Periode von rd. 14,77 Tagen und am Pegel Helgoland eine Amplitude von ca. 35 cm. Entgegen der zuvor bereits zitierten gängigen Vorstellung, dass sich der Tidehub linear verstärkt ins Ästuar übertragen lässt, kann man durch eine Analyse der Phasendifferenz

zwischen M2 und S2 feststellen, dass die relative Zunahme des Tidehubs zur Springzeit – also bei hohen Tidehüben – geringer ausfällt als zur Nippzeit. Darüber hinaus entsteht im Ästuar eine langperiodische Schwingung mit der Frequenz der MSf, deren maximale Auslenkung sich stromauf von 0,5 cm in der Mündung auf 5 cm bis Hamburg verstärkt. Das bedeutet, dass sich auch ohne Wind der Ruhewasserspiegel in Hamburg während der Spring-Zeit um 10 cm höher einstellt als zur Nippzeit und damit prinzipiell auch die Transformation der Tidewelle im Ästuar beeinflusst.

Mit der Periode eines Jahres bildet sich infolge Schwebung zwischen der M2 und ihrer eng benachbarten Partialtiden MA2 und MB2 eine Schwingung des Tidehubs mit einer Amplitude von rd. 9 cm am Pegel Helgoland und aktuell etwa 25 cm am Pegel St. Pauli aus (Abbildung 12). Diese Schwebung hat ihr Maximum im Mai und ein Minimum im November. Die Auslenkung dieser Schwingung des Tidehubs hat in den vergangenen Jahren deutlich stärker als der Jahresmittelwert des Tidehubs zugenommen.

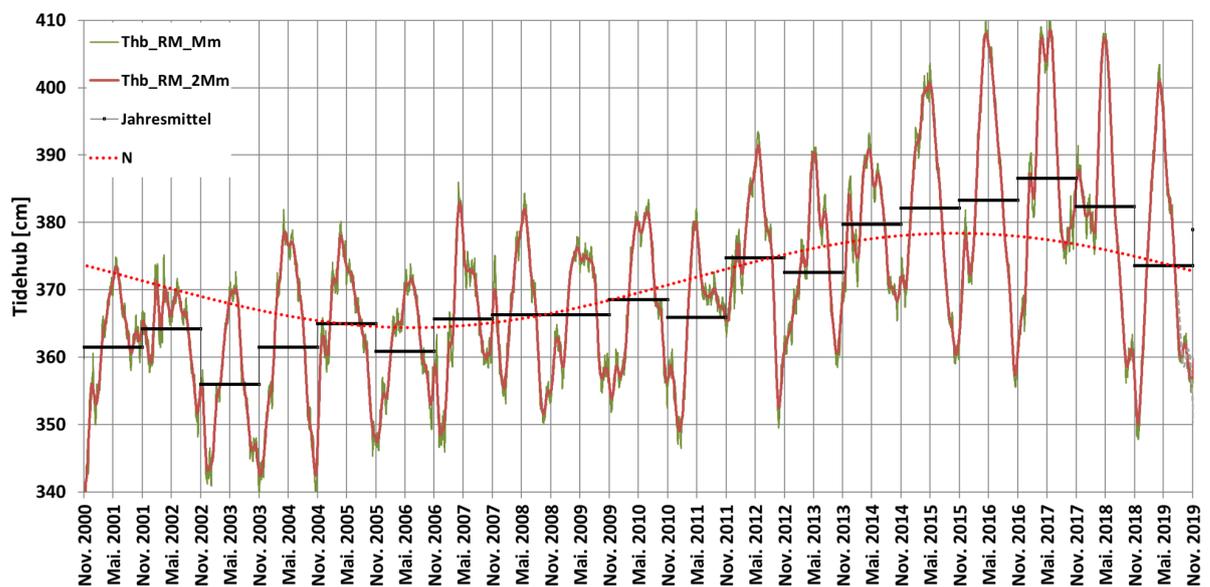


Abbildung 12: Jahresvariation und Modulation des Tidehubs durch die Nodaltide am Pegel St. Pauli.

Dargestellt ist auch die Nodaltide mit einem 18,61-jährigen Zyklus, verursacht durch die Rotation des aufsteigenden Knotens der Mondbahn. Die Nodaltide äußert sich in einer Modulation des Tidehubs mit einer Amplitude am Pegel Helgoland von etwa 3,5 cm und am Pegel St. Pauli mit rd. 5,8 cm, also ca. 3 % des mittleren Tidehubs. Im Oktober 2015 hat das letzte Nodalmaximum und ca. Mitte 2006 das letzte Minimum vorgelegen. Diese nodale Modulation über 18,6 Jahre hat somit mit einem Anstieg von ca. 1,25 cm/Jahr zur starken Zunahme des Tidehubs beigetragen.

2.3 Strömungsgeschwindigkeiten

Für die nachfolgende Betrachtung werden Strömungsdauermessungen der WSV für den Bereich zwischen Elbe-km 643,0 (Wedel, Station D1) und 676,5 (Rhinplate, Station D4) aus den Jahren 2005 bis 2019 sowie Strömungsdauermessungen der HPA bei Elbe-km 631,0 (Teufelsbrück) herangezogen. Bei den WSV-Strömungsdaten handelt es sich um Punktmessungen an Standorten in Gewässerquerschnitten, in deren Umfeld i. A. nur

geringe morphologische Veränderungen stattfinden. Seit 2006 werden ergänzend alljährlich *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP)-Messungen über eine ganze Tide in diesen Querschnitten durchgeführt, um Informationen über die Querverteilung der Strömung zu erhalten. Bei den Strömungsdaten in Hamburg handelt es sich um querschnittsgemittelte Messungen.

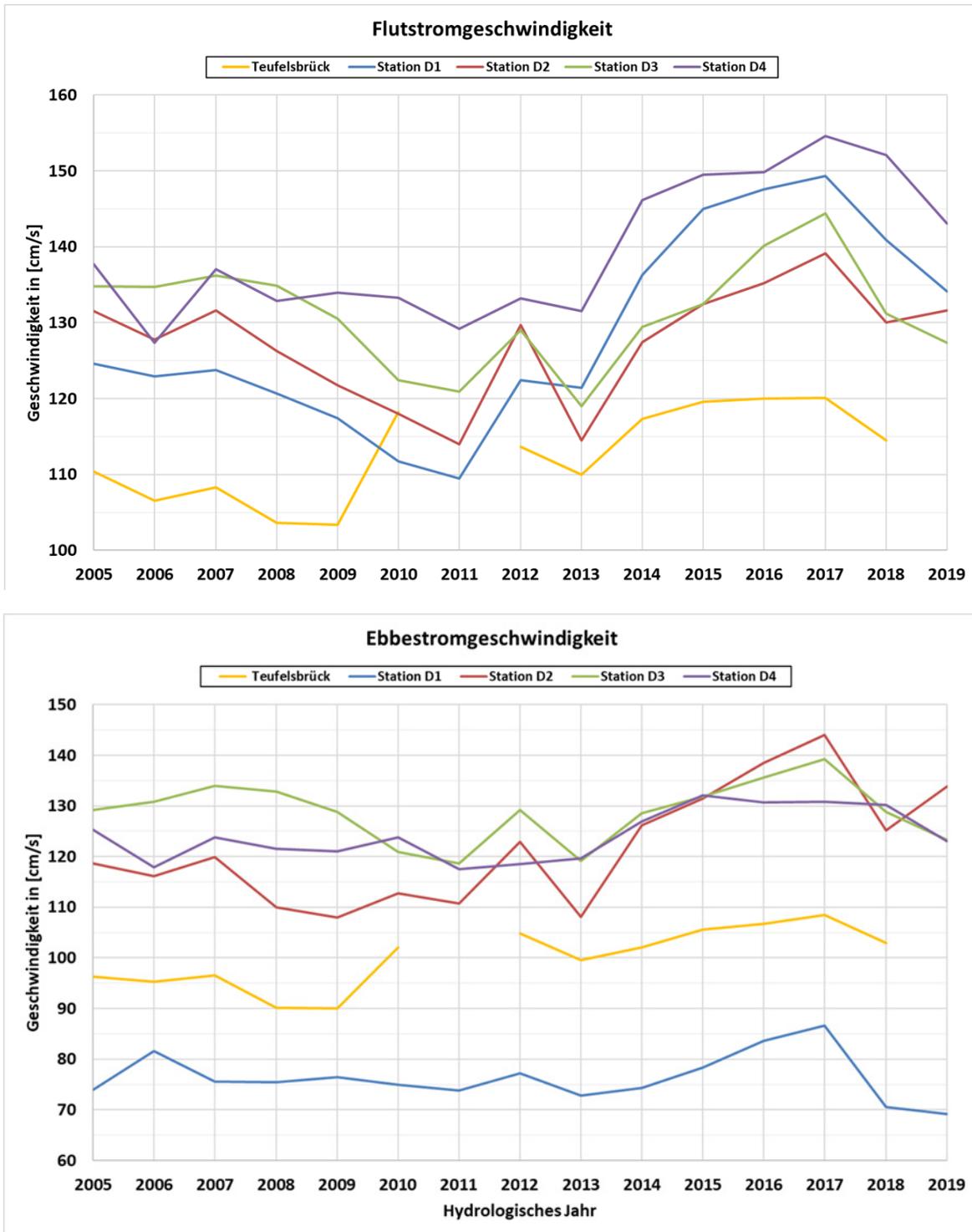


Abbildung 13: Entwicklung der mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten an den WSV-Stationen D1 bis D4 sowie an der HPA-Station Teufelsbrück (Mittelwerte über Gewässerkundliches Jahr; oben: Flutstrom, unten: Ebbestrom).

Die Zeitreihen in Abbildung 13 verdeutlichen die Entwicklungen der mittleren maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (Berechnung über ein Gewässerkundliches Jahr, oberflächennahe Messwerte). Grundsätzlich zeigen sich langjährig betrachtet erhebliche Schwankungen. Für das Jahr 2011 gibt es für Teufelsbrück keine repräsentativen Daten. Für die Jahre 2014 bis 2017 ist erkennbar, dass die mittleren maximalen Geschwindigkeiten sowohl für den Ebbe- wie auch den Flutstrom an allen Stationen auf einem um ca. 20–30 cm/s höheren Niveau liegen als in davorliegenden Jahren. Mittels weitergehender Auswertungen kann ein maßgeblicher Einfluss unterschiedlicher Messzeiträume im Jahr negiert werden, die sich unter anderem ergeben, da die bojen-gebundenen Messstationen der WSV im Winterhalbjahr bei Eisgang über längere Zeiträume eingeholt werden.

Anderes als beim Tidehub sind die Veränderungen bezüglich der mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten erst im Nachgang des Juni-Hochwassers 2013 zu beobachten. Nach Höchstwerten in 2017 ist dann, parallel zum Absinken des MThb, seit 2018 ein Rückgang zu erkennen. Die Entwicklung der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten (hier grafisch nicht dargestellt), ist ähnlich, aber schwächer ausgeprägt.

Eine besondere Situation zeigt sich bei D1. Hier ist anders als an allen anderen Stationen nicht nur ein großer Unterschied zwischen den Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zu erkennen, sondern auch eine deutliche Veränderung der Flut- und Ebbestromdauern zu beobachten (Abbildung 14). Dazu ist anzumerken, dass D1 anders als die anderen Stationen im Flutstrom eine exponierte Prallhangle (Bereich Leitdamm Hanskalbsand, Südufer) hat, während sich der Ebbestrom hier stärker in Richtung Nordufer ausbildet.

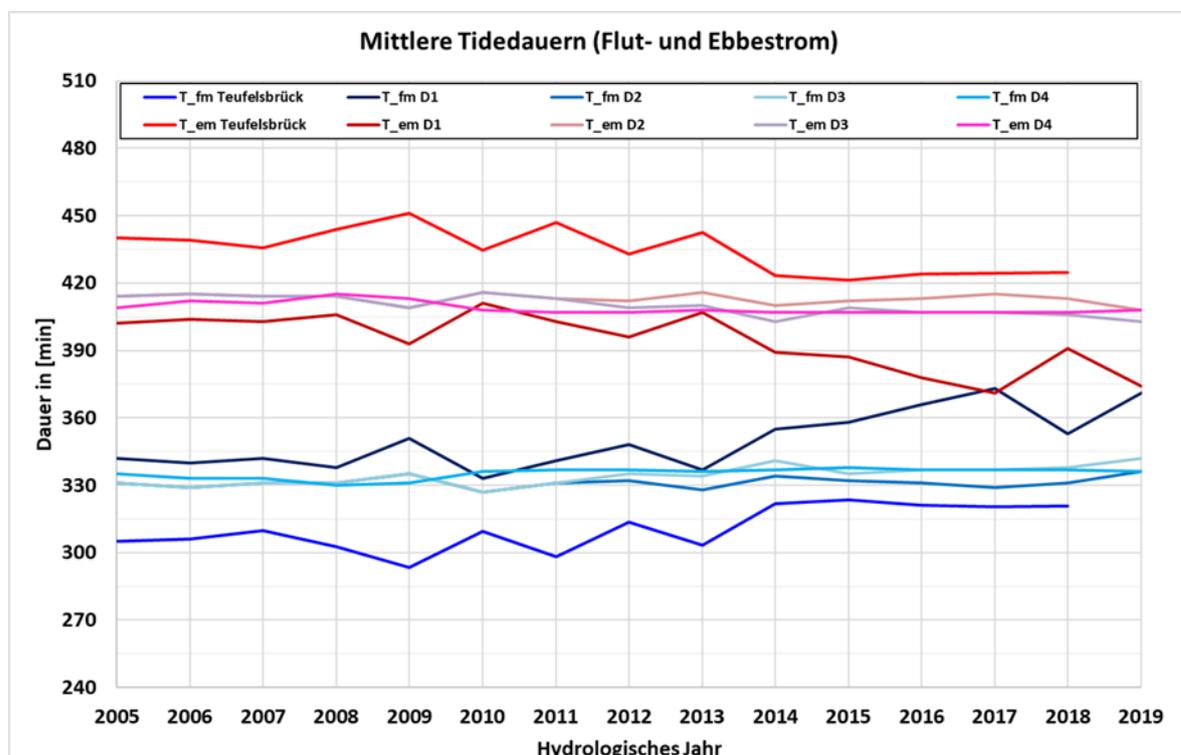


Abbildung 14: Entwicklung der mittleren Flut- und Ebbestromdauern an den Station D1 bis D4 (WSA Hamburg, oberflächennahe Messung) sowie an der Station Teufelsbrück (HPA, tiefen- und querschnittsgemittelte Messung); oben: Ebbestrom, unten: Flutstrom.

Die Auswertungen der jährlichen ADCP-Ganztidenmessungen verdeutlichen zunächst die Größenordnungen der Unterschiede zwischen Flut- und Ebbestromdauern im Bereich des Prallhanges (Abbildung 14) gegenüber den gemittelten Flut- und Ebbestromdauern über

den Gesamtquerschnitt (Abbildung 15). Die Flutstromdauer ist über den Gesamtquerschnitt betrachtet geringer, die Ebbestromdauer länger als am Prallhang bei D1 gemessen. Entsprechend sind auch die Veränderungen nach 2013 geringer.

Es verbleibt aber eine Zunahme bei den gemessenen Flutstromdauern von ca. 15 Minuten im Zeitraum 2014 bis 2019 gegenüber den Vorjahren 2006 bis 2013 bei entsprechender Verringerung der Ebbestromdauern. Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich in Abbildung 15 an der Messstation Teufelsbrück. Maßgeblich für die Entwicklung dürften die geringeren Oberwasserzuflüsse nach 2013 sein. An den weiter stromab gelegenen Stationen D2 bis D4 sind entsprechende Effekte aufgrund des zunehmenden Tideprismas und dem damit geringeren Einfluss des Oberwasserzuflusses nicht mehr erkennbar.

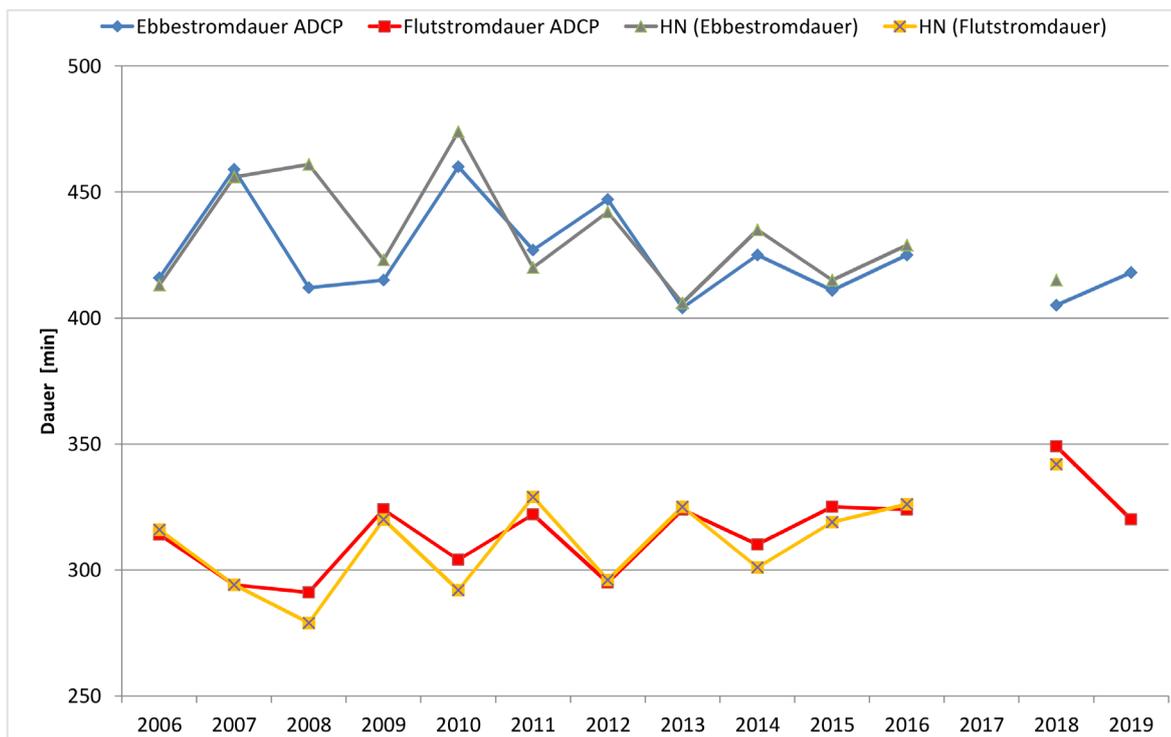


Abbildung 15: Entwicklung der Flut- und Ebbestromdauern bei jährlichen ADCP-Messungen im der Messstation D1 zugeordneten Gewässerquerschnitt Q1 und in der Hahnöfer Nebelbe (WSA Hamburg, jährliche Messung über ein Tide; ADCP: Mittelwert über gesamten Querschnitt, Hahnöfer Nebelbe (HN): parallele Punktmessung; oben: Ebbestrom, unten: Flutstrom; in 2017 wurden keine Messungen durchgeführt).

2.4 Trübung und Schwebstoffgehalte

Zusätzlich zu den Strömungsgeschwindigkeiten wird an denselben gewässerkundlichen Dauermessstationen auch die Gewässertrübung erfasst. In der Niedrigwasserphase 2013f war parallel zu den in Kapitel 2.2 beschriebenen Veränderungen der Tidewasserstände und dem in Kapitel 2.3 skizzierten tendenziellen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten auch ein Anstieg der Gewässertrübung zu beobachten. Für den Bereich Hamburg werden Trübungsdaten von der Gewässergütemessstelle Seemannshöft (betrieben durch das Hamburger Hygiene-Institut) herangezogen. Die Trübung als optische Messgröße wurde an allen Stationen in korrespondierende Schwebstoffgehalte umgerechnet (BAW 2018).

An allen Stationen konnte entweder zu Ende 2013 oder zu Anfang 2014 eine sprunghafte Erhöhung der Trübungsverhältnisse und damit der Schwebstoffgehalte festgestellt

werden. Hierzu wurden die langjährigen Zeitreihen der durch Umrechnung erzielten Schwebstoffgehalte einer statistischen Bruchpunktanalyse unterzogen (Pettitt 1979). Die Ergebnisse der Analyse, also die Zeitpunkte, zu denen die sprunghafte Erhöhung an jeder Station stattgefunden hat, sind weiter unten in der Tabelle 1 aufgeführt. An der Station Seemannshöft (Elbe km 628,9) hat sich das Niveau der Schwebstoffgehalte etwa Anfang Februar 2014 von zuvor im Mittel 52 mg/l (2007–2013) auf das 2-fache erhöht (Abbildung 16). Bemerkenswert ist dabei die auch im gleitenden Monatsmittel gut erkennbare spontane Erhöhung innerhalb weniger Tage von einem noch durch das Juni-Hochwasser 2013 begünstigten unterdurchschnittlich niedrigen Niveau auf Werte um die 150 mg/l zu Beginn des Jahres 2014. Erhöhte Schwebstoffgehalte auf diesem Niveau gab es auch in den Jahren vor 2014, aber bisher verharrten erhöhte Schwebstoffgehalte nur wenige Wochen auf diesem Niveau und fielen dann wieder auf bzw. unter den Schnitt. Seit 2014 ist eine deutlich höhere Schwankungsbreite auf einem dauerhaft erhöhten Niveau mit maximalen Spitzen von bis zu rd. 250 mg/l im Tagesmittel (Februar 2017) zu beobachten. Zu Ende des Jahres 2017 begannen die Schwebstoffgehalte im Zuge einer mehrmonatigen Phase von etwas höheren Oberwasserzuflüssen (Zeitraum November 2017 bis Februar 2018 mit rd. 1000 m³/s im Durchschnitt) vorübergehend zu sinken. Im Laufe des Jahres stiegen die Gehalte wieder an und erreichten spätestens zu Beginn des Herbstes 2018 das erhöhte Niveau der Vorjahre.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei Betrachtung der Schwebstoffgehalte im zeitlichen Verlauf an der Station D1 (Hanskalbsand, Elbe-km 643,0), welche die erste Station stromab der Landesgrenze zu Hamburg ist. Abbildung 17 zeigt vergleichbar die tagesgemittelten, oberflächennahen Schwebstoffgehalte von Oktober 2006 bis Dezember 2018, die gleitenden Monatsmittel sowie die beiden mittleren Niveaus von bzw. bis zum statistisch ermittelten Bruchpunkt für die Station D1 in der oberflächennahen Messebene im Januar 2014. Auffällig ist auch hier die ebenfalls spontane Erhöhung der Schwebstoffgehalte. Während bis Januar 2014 ein langfristig mittlerer Schwebstoffgehalt von ca. 75 mg/l beobachtet werden konnte, liegen die Werte danach insgesamt auf einem deutlich gesteigerten Niveau von ca. 165 mg/l und sind somit um mehr als das Zweifache höher. Zwar wurden in früheren Zeiträumen auch schon vergleichsweise hohe Schwebstoffgehalte von bis zu rd. 170 mg/l im gleitenden Monatsmittel (Dezember 2011) erreicht, jedoch liegen die Maxima nach Januar 2014 deutlich höher (ca. 25–40 %). Außerdem hat die Schwankungsbreite der Schwebstoffgehalte bei D1 seit dem Eintreten dieser sprunghaften Erhöhung, wie auch zuvor für die Seemannshöft beschrieben, stark zugenommen. Auch an der Station D1 ist es zu einem Rückgang der Schwebstoffgehalte zu Jahresende 2017 gekommen, im Vergleich zur Station Seemannshöft ist dieser jedoch deutlich schwächer ausgefallen.

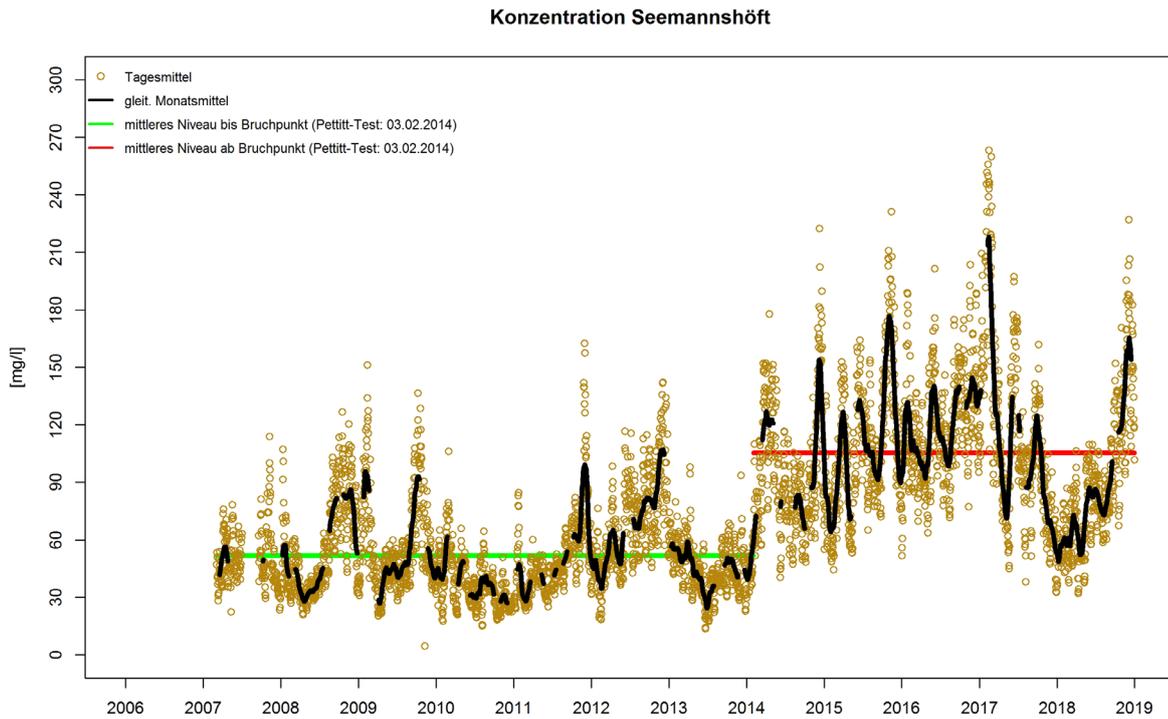


Abbildung 16: Entwicklung der oberflächennahen Schwebstoffgehalte (Tagesmittelwerte) an der Gewässergütemessstelle Seemannshöft (betrieben durch das Hamburger Hygiene-Institut) seit 2007.

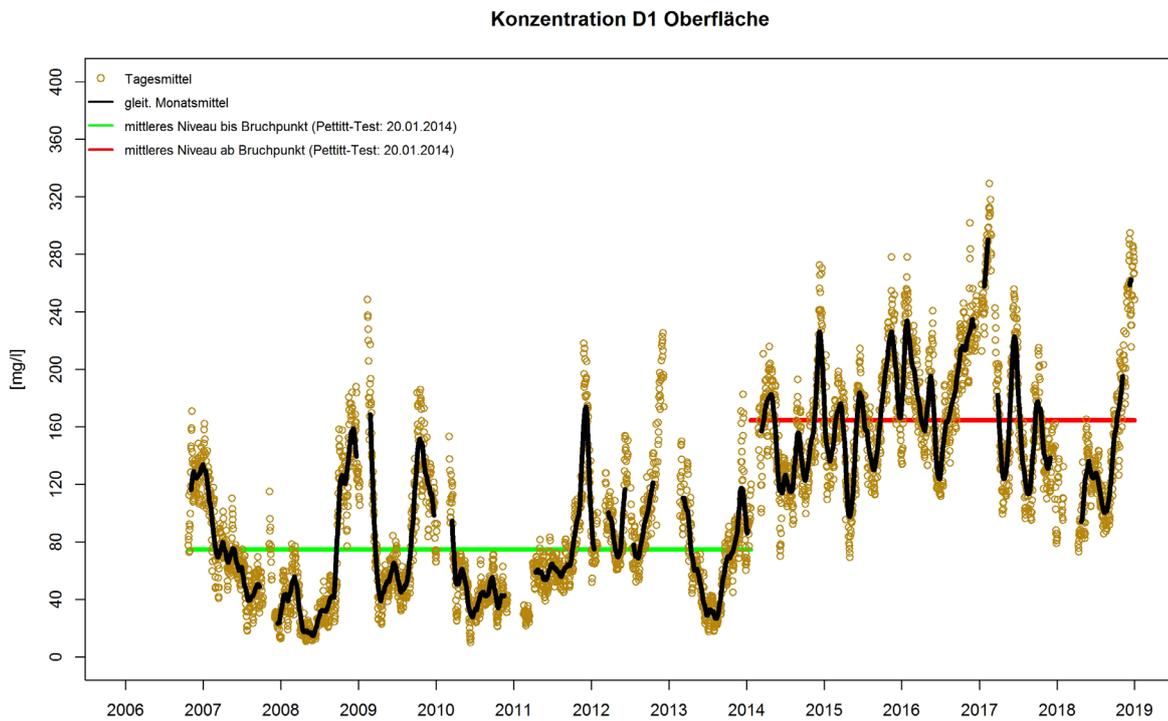


Abbildung 17: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstelle D1 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) seit 2006. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.

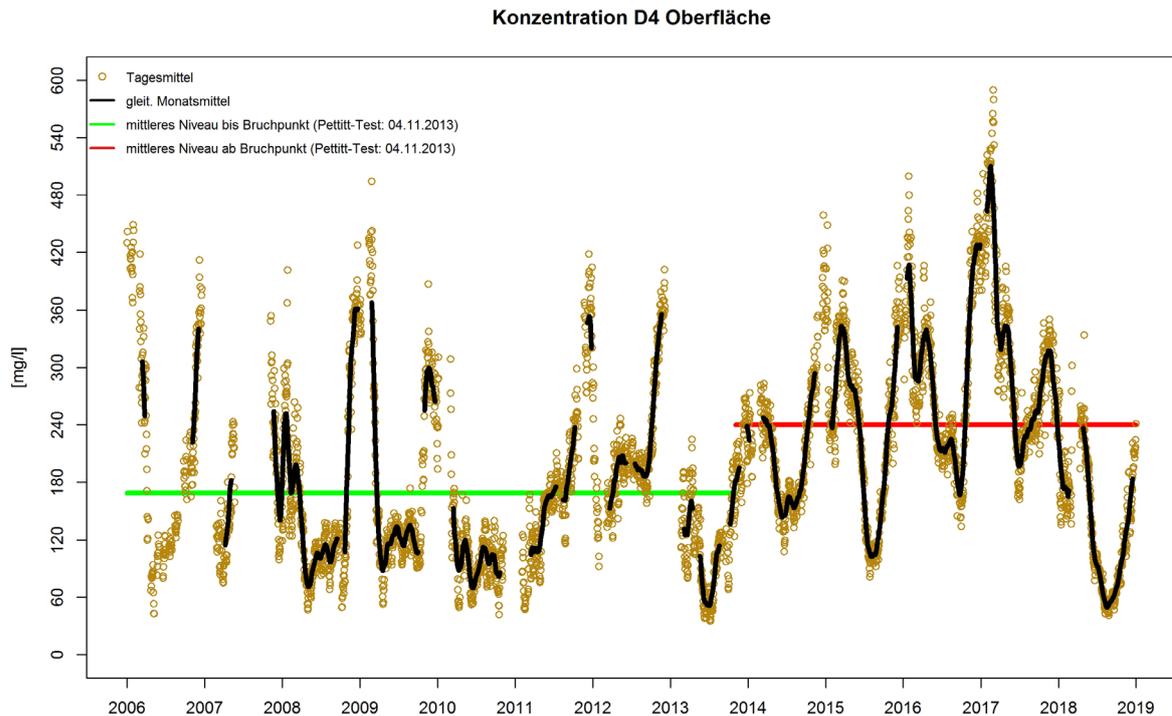


Abbildung 18: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermessstelle D4 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) seit 2006. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch an den Dauermessstationen D2 und D3 (Elbe-km 651,3 und 664,7, hier nicht dargestellt). Auch die in Abbildung 18 dargestellte Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der 33,5 km stromab von D1 gelegenen Dauermessstelle D4 (Rhinsplate, Elbe-km 676,5) weist einen Sprung der beiden mittleren Niveaus zum November 2013 auf, der Faktor ist mit 1,4 jedoch etwas geringer. Die Spitzen für die Schwebstoffgehalte vor dieser sprunghaften Erhöhung erreichten im Monatsmittel knapp das Ausmaß wie im Zeitraum danach, jedoch kann in der Vergangenheit auch eine etwas geringere Schwankungsbreite der Gehalte beobachtet werden.

Die mittleren Niveaus der beiden Zeiträume bis zum Eintreten dieser sprunghaften Erhöhung (Referenz) sowie im Zeitraum danach (aktuell) für alle Stationen sind nochmals in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt. An den Stationen D1 bis D4 werden zusätzliche Trübungsdaten und damit Schwebstoffgehalte auch in einer sohnnahen Messebene gemessen und sind ebenfalls in Tabelle 1 enthalten. Stromab der Station D4 liegen keine durchgängig qualitätsgesicherten Daten vor und wurden daher an dieser Stelle nicht zur Ausweitung der Analyse herangezogen.

Die dargestellten Zeitreihen für die Schwebstoffgehalte sowie der in Tabelle 1 gegebene Überblick für alle Stationen und Messebenen zeigen eindeutig, dass es gemäß den statistischen Testergebnissen im Zeitraum zwischen Oktober 2013 und Februar 2014 an allen Dauermessstationen zu einer spontanen Erhöhung der Trübung bzw. der korrespondierenden Schwebstoffgehalte im Bereich des gesamten inneren Ästuars gekommen ist. Seitdem sind die Schwebstoffgehalte an sämtlichen Stationen und Messebenen auf diesem hohen Niveau verharret, auch die Schwankungsbreite zwischen maximalen und minimalen Gehalten hat gegenüber dem Referenzzustand vor Eintreten dieser spontanen Erhöhung zugenommen.

Tabelle 1: Langfristige mittlere Niveaus der Schwebstoffgehalte (Stationen D1 bis D4 sowie Station SH-Seemannshöft) in den Zeiträumen bis Februar 2014 zum Eintreten einer sprunghaften Erhöhung (Referenz) sowie im Zeitraum danach ab Februar 2014 (aktuell); die Trübungswerte an den Stationen im Amtsbereich WSA Hamburg (D1, Elbe-km 643 bis D4, Elbe-km 676,5) wurden auf Schwebstoffgehalte umgerechnet, eine Umstellung der optischen Sensorik in 2011 ist dabei berücksichtigt worden.

Station	Oberflächennahe Messebene [mg/l]				Sohlennahe Messebene [mg/l]			
	Statistisch ermittelter Bruchpunkt (Pettitt-Test)	Referenz bis Bruchpunkt (Mittelwert)	aktuell nach Bruchpunkt (Mittelwert)	Faktor	Statistisch ermittelter Bruchpunkt (Pettitt-Test)	Referenz bis Bruchpunkt (Mittelwert)	aktuell nach Bruchpunkt (Mittelwert)	Faktor
SH*	Feb. 2014	52	105	2,0	-	-	-	-
D1	Jan. 2014	75	165	2,2	Okt. 2014	214	360	1,7
D2	Dez. 2013	86	216	2,5	Dez. 2013	243	459	1,9
D3	Okt. 2013	115	224	1,9	Okt. 2013	349	513	1,5
D4	Nov. 2013	169	240	1,4	Okt. 2013	341	434	1,3

*Seemannshöft

Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse, wie in Tabelle 1 dargestellt, zeigt sich, dass der Faktor der Erhöhung zwischen 1,4 und 2,5 auf der oberflächennahen Messebene und zwischen 1,3 und 1,9 auf der sohlernen Messebene beträgt und damit von ähnlicher Größenordnung ist. Die stärkste Erhöhung kann etwa auf den Abschnitt zwischen D1 und D2 eingegrenzt werden, weiter stromab nimmt die Entwicklung ab. Das zeitliche Eintreten der Bruchpunkte folgt einem Muster, gemäß dem diese Erhöhung zuerst an den weiter stromab gelegenen Stationen D3 und D4 stattgefunden hat und dann im Zeitraum von Dezember 2013 bis Januar 2014 die Stationen D1 und D2 erreicht hat und zuletzt im Februar 2014 an der am weitesten stromauf gelegenen Station Seemannshöft beobachtet werden konnte.

Auffällig ist, dass die Bruchpunktanalyse einen Zeitraum von Oktober 2013 bis Februar 2014 ergeben hat, zu dessen Beginn zwei Sturmflutereignisse stattgefunden haben: Sturmtief Christian am 28.10.2013 sowie am 5./6.12.2013 das Orkantief Xaver. Diese haben viel Sediment auf den angrenzenden Watten und Vorländern mobilisiert und die feinkörnigen Anteile sind im Anschluss stromauf transportiert worden, denn zugleich hat sich an diese beide Sturmflutereignisse die aktuelle Phase eines inzwischen durchgängig seit sechs Jahren unterdurchschnittlich niedrigen Oberwasserzuflusses angeschlossen.

Einzigste Ausnahme an dem zuvor beschriebenen Muster ist die Station D1 und hier die sohlernahe Messebene. Diese zeigt einen etwas späteren Bruchpunkt und damit einen sprunghaften Anstieg der Schwebstoffgehalte im Oktober 2014. Hierbei ist auffällig, dass die Station D1 nur wenige Kilometer stromab der Verbringstelle Neßsand liegt, auf der ab November 2014 und den darauffolgenden Monaten im Vergleich zu den Vorjahren überdurchschnittlich große Mengen an Unterhaltungsbaggergut durch die HPA verbraucht worden sind. Zugleich kann das menschliche Auge in der Zeitreihe für die sohlernen Schwebstoffgehalte an der D1 eine weitere sprunghafte Erhöhung der Schwebstoffgehalte ebenfalls im Zeitraum Oktober 2013 und Februar 2014 erkennen (Abbildung 19). Leider wurde dieses Ereignis aufgrund einer einmonatigen Datenlücke im Januar/Februar 2014

messtechnisch nicht vollständig erfasst, so dass diese Daten fehlen und auch nicht in den Pettitt-Test eingehen und durch diesen erfasst werden konnten.

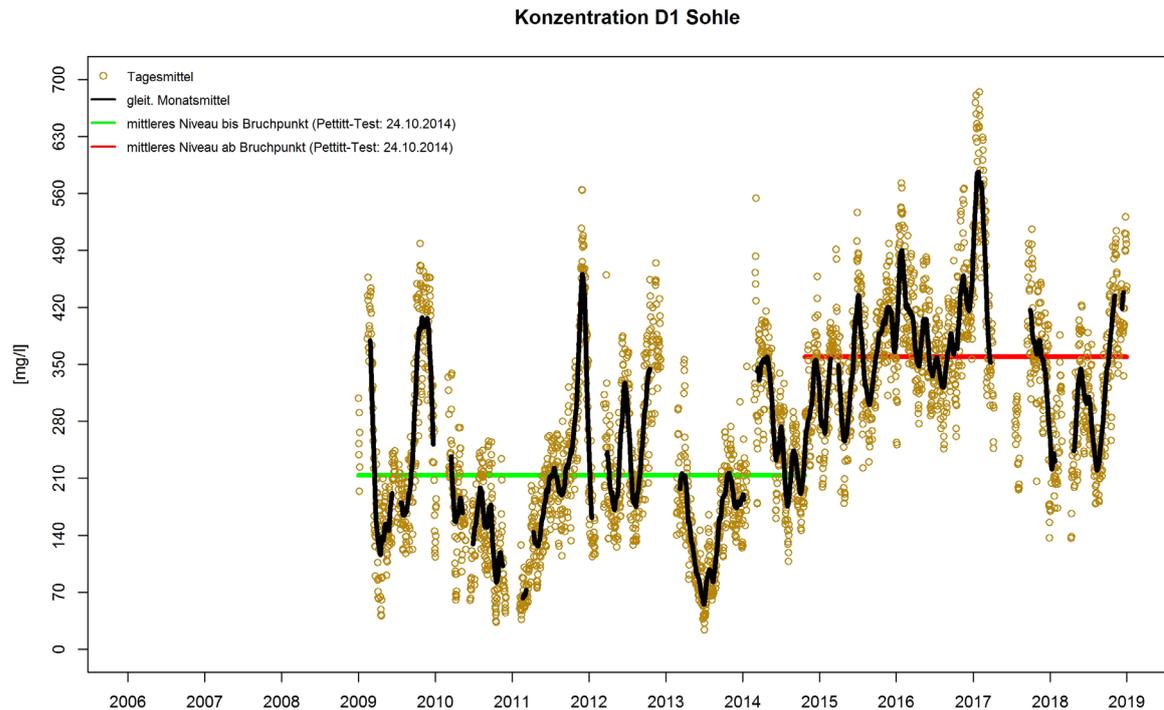


Abbildung 19: Entwicklung der Schwebstoffgehalte an der Dauermesstelle D1 (Tagesmittelwerte, Messebene ca. 1 m über der Gewässersohle) seit 2009. Die Schwebstoffgehalte wurden auf Basis der hier gemessenen Trübungswerte bestimmt.

Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Schwebstoffgehalte nochmals in anderer Form. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (Gewässerkundliches Jahr) für die Schwebstoffgehalte bei Flutstrom von 2011 bis 2019 (links) sowie die Differenzen zum Bezugsjahr 2011 (rechts). Das Niveau der Jahresmittelwerte liegt oberhalb der zuvor diskutierten Zahlen in Tabelle 1, da die Flutstromgeschwindigkeiten an den hier betrachteten Dauermesstationen D1 bis D4 höher als die Ebbestromgeschwindigkeiten und die Flutstromdauern kürzer als die Ebbestromdauern sind (vgl. Kapitel 2.3). Aufgrund der damit stärkeren Resuspension sind die mittleren Schwebstoffgehalte bei Flutstrom entsprechend höher.

In 2016 lagen die mittleren oberflächennahen Schwebstoffgehalte (erfasst bei Flutstrom an den Stationen D1 bis D4) im Mittel um rd. 300 mg/l höher als die Werte, die in 2013 zu Beginn der Niedrigwasserphase 2013f gemessen wurden (Abbildung 20, unten). Nach 2016 war dann eine weitere Erhöhung der Gehalte nur noch bei D3 und D4 zu verzeichnen. Aus den sohnahen Messungen bei D1 bis D4 (zweite Messebene, rd. 1 m über der Gewässersohle) lässt sich für den Bezugszeitraum die gleiche Entwicklung abbilden, wobei die Schwebstoffgehalte hier in 2016 im Mittel um rd. 650 mg/l höher als in 2013 lagen. In 2018 und 2019 wurden an diesen Stationen gegenüber 2017 wieder durchweg niedrigere Werte gemessen. Auffällig ist aber gleichzeitig, dass an den Station D1 und D2 deutlich höhere Werte als in den Jahren 2011 bis 2014 gemessen wurden. Die Schwebstoffgehalte verharren hier, am oberen Ende der Trübungszone der Tideelbe, auf einem hohen Niveau.

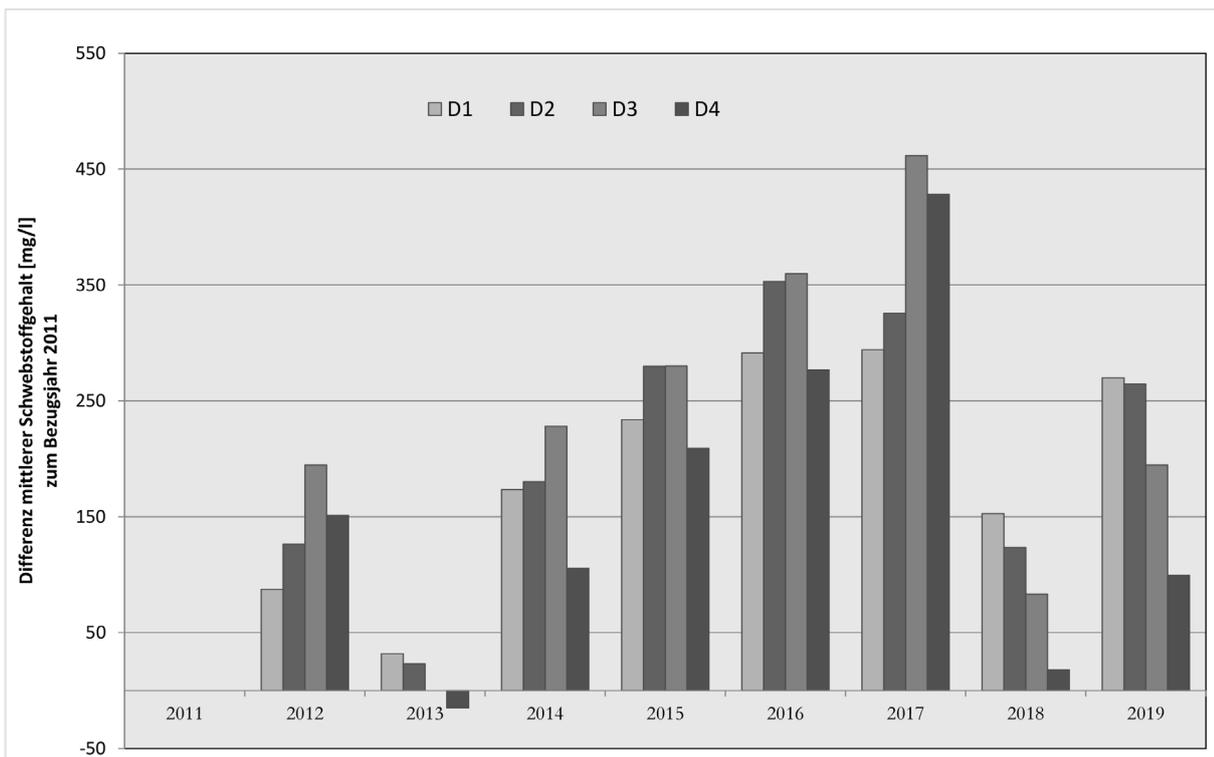
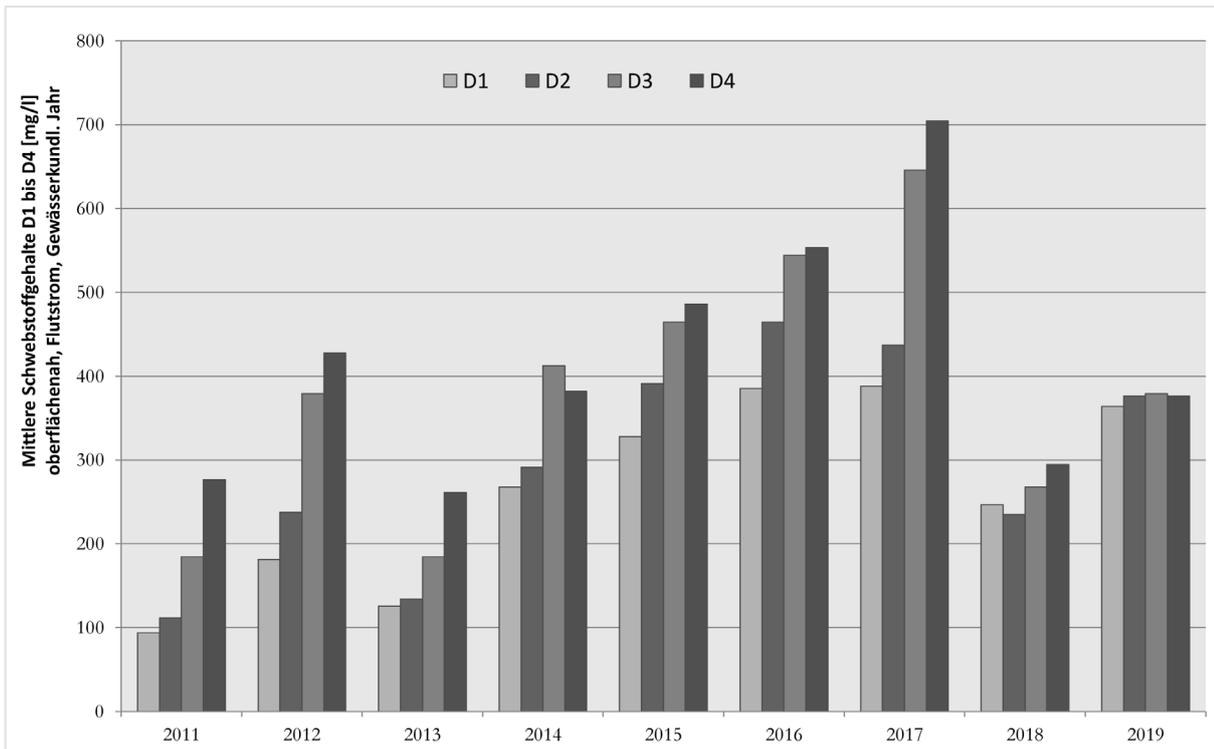


Abbildung 20: Mittlere Schwebstoffgehalte während Flutstrom (Messebene ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche) an den Dauermessstationen D1 (Wedel) bis D4 (Rhinplate). Oben: Entwicklung im Zeitraum 2011 bis 2019), unten: dazugehörige Differenzen zum Bezugsjahr 2011.

Die an Tonnen befestigten Stationen D1 bis D4 liegen aufgrund nautischer Erfordernisse alle außerhalb der Fahrrinne und können daher nicht die dortigen sohnahen Schwebstoffgehalte und -transporte registrieren, die wesentlich höhere, aber per Messung bislang nur wenig erfasste Werte erreichen. Ein erster Einblick in die dort vorherrschenden

Verhältnisse wurde im November 2015 von der BAW im Rahmen des FuE-Projektes „Schiffserzeugter Sedimenttransport“ erarbeitet. Während einer Sondermessung wurden u. a. sorgfältig validierte Messungen der Schwebstoffkonzentration an der Sohle der Fahrrinne durchgeführt. Die Abbildung 21 zeigt die Positionierung der Messgeräte bei Elbe-km 646,8.

Die Abbildung 22 zeigt die gemessenen sohnnahen Schwebstoffgehalte an der Position W4. Obwohl in diesem Bereich das Sedimentinventar eher sandig ist, werden Spitzenwerte von bis zu 4 g/l erreicht. Tidegemittelt liegen die sohnnahen Schwebstoffgehalte bei ca. 1,5 g/l, also rund eine Größenordnung mehr als an den Dauermessstationen registriert.

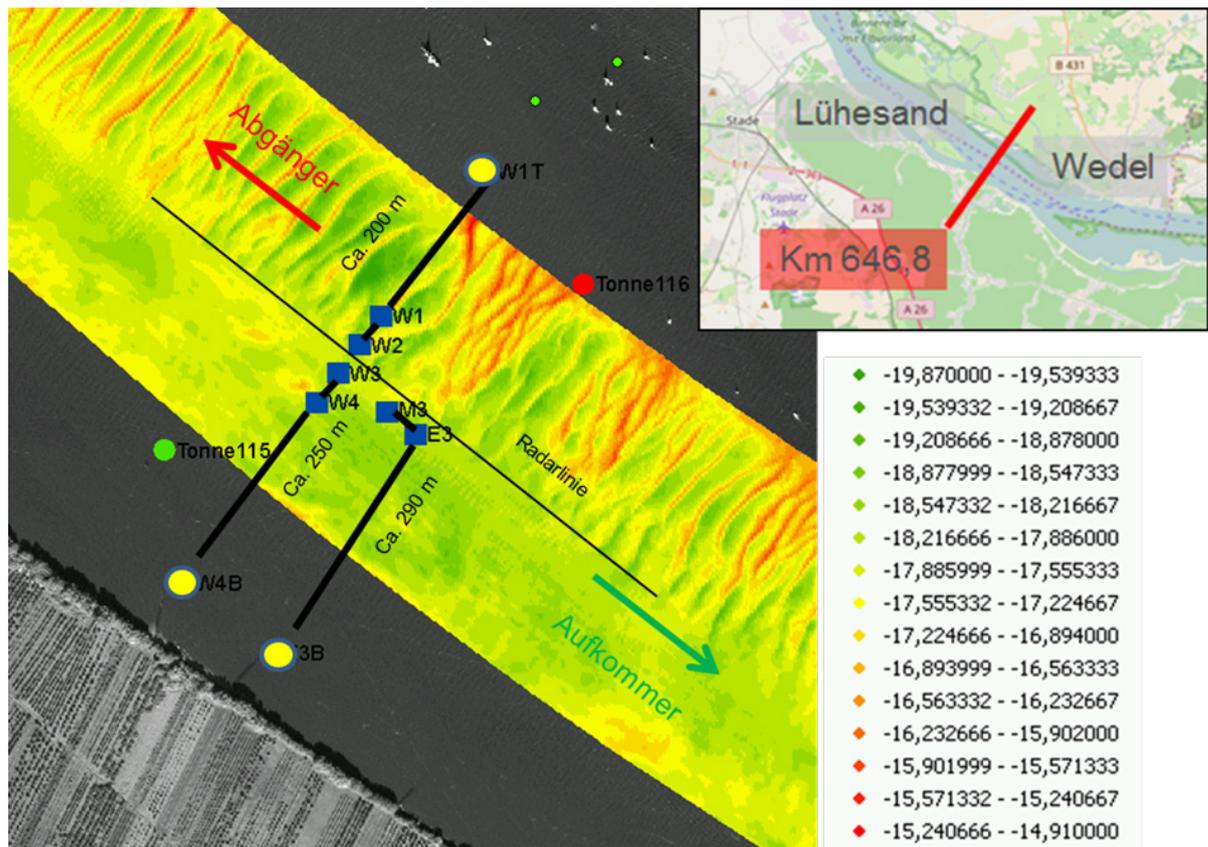


Abbildung 21: Im Rahmen des FuE-Projektes „Schiffserzeugter Sedimenttransport“ der BAW wurden im November 2015 u. a. sorgfältig validierte Messungen der Schwebstoffgehalte an der Sohle der Fahrrinne durchgeführt. Die Abbildung zeigt die Positionierung der Messgeräte.

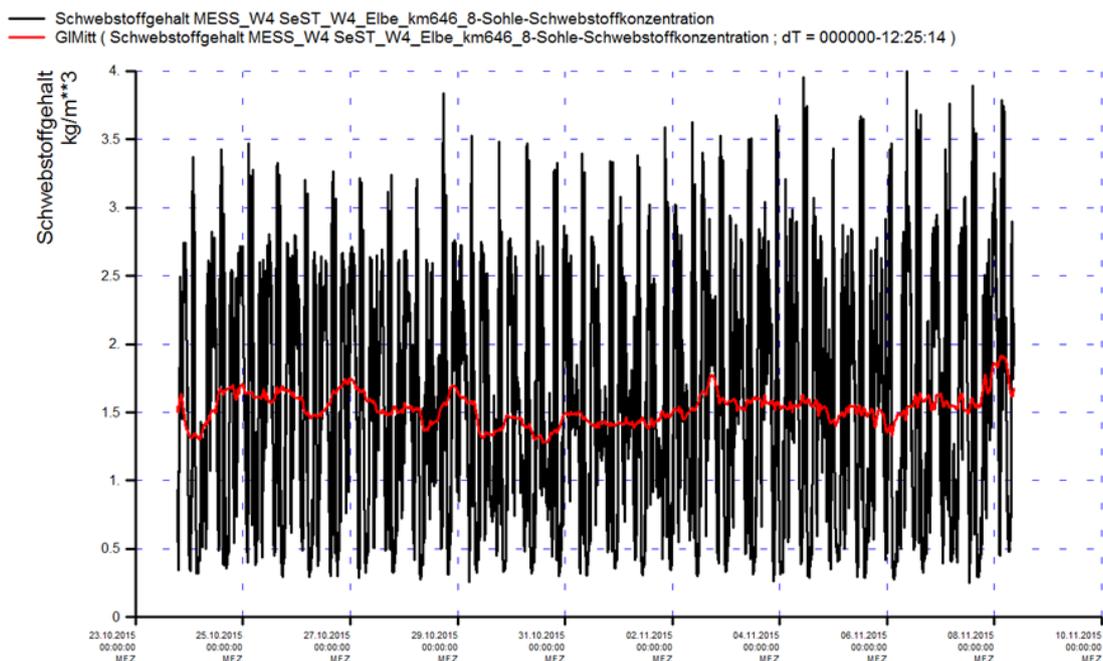


Abbildung 22: Gemessene sohlnahe Schwebstoffgehalte an der Position W4.

In einer an der BAW-DH durchgeführten Master-Arbeit (Hillmann 2017) wurde, basierend auf den Einzelpunktmessungen an D1 bis D4 im Zeitraum 2011 bis 2016 sowie weiteren Daten der Messstationen im WSV-Amtsbereich Cuxhaven, die Variabilität der Trübungszone der Tideelbe in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss seit 2013 untersucht. Abbildung 23 zeigt eine Darstellung, in der der Abflusskategorie 2000 bis 4000 m³/s (grüne Linie) Messdaten des Frühsommerhochwassers 2013 und den Abflusskategorien 0 bis 500 m³/s (blaue Linie) sowie 500 bis 700 m³/s (orange Linie) Messdaten aus den Folgejahren 2014 bis 2016 zu Grunde liegen. Demnach wurden die höchsten Schwebstoffgehalte in Folge des Hochwassers 2013 bei LZ3 (Otterndorf, Elbe-km 715) gemessen, das Schwebstoffinventar war insgesamt sehr gering. Die weiteren ausgewerteten Messungen zeigten deutlich höhere Schwebstoffgehalte (Anstieg des Schwebstoffinventars) und in der Abflusskategorie 500 bis 700 m³/s eine starke Angleichung an den Messstationen D3, D4 und LZ2 (Bereich Pagensand bis Osteriff). Bei geringeren Oberwasserzuflüssen wurden die höchsten Werte an D3 erfasst (Pagensand, Elbe-km 664,7). Während die Messwerte der Stationen stromab von D3 bei extrem niedrigen Abflüssen (0–500 m³/s) gegenüber der Abflusskategorie 500 bis 700 m³/s geringer waren, d. h. bei noch niedrigerem Oberwasser absanken, waren sie stromauf bei D1 (Hanskalbsand, Elbe-km 643,0) und D2 (Juelssand, Elbe-km 651,3) erhöht. Eine vergleichbare Situation liegt in 2019 vor (vgl. Abbildung 20), wobei die ausschließlich auf Flutstrom bezogenen Werte hier bei D1 und D2 in der oberflächennahen Messung (rd. 1,5 m unter Wasseroberfläche) im Bereich von 380 mg/l und auf einem annähernd gleichen Niveau wie bei D3 und D4 liegen.

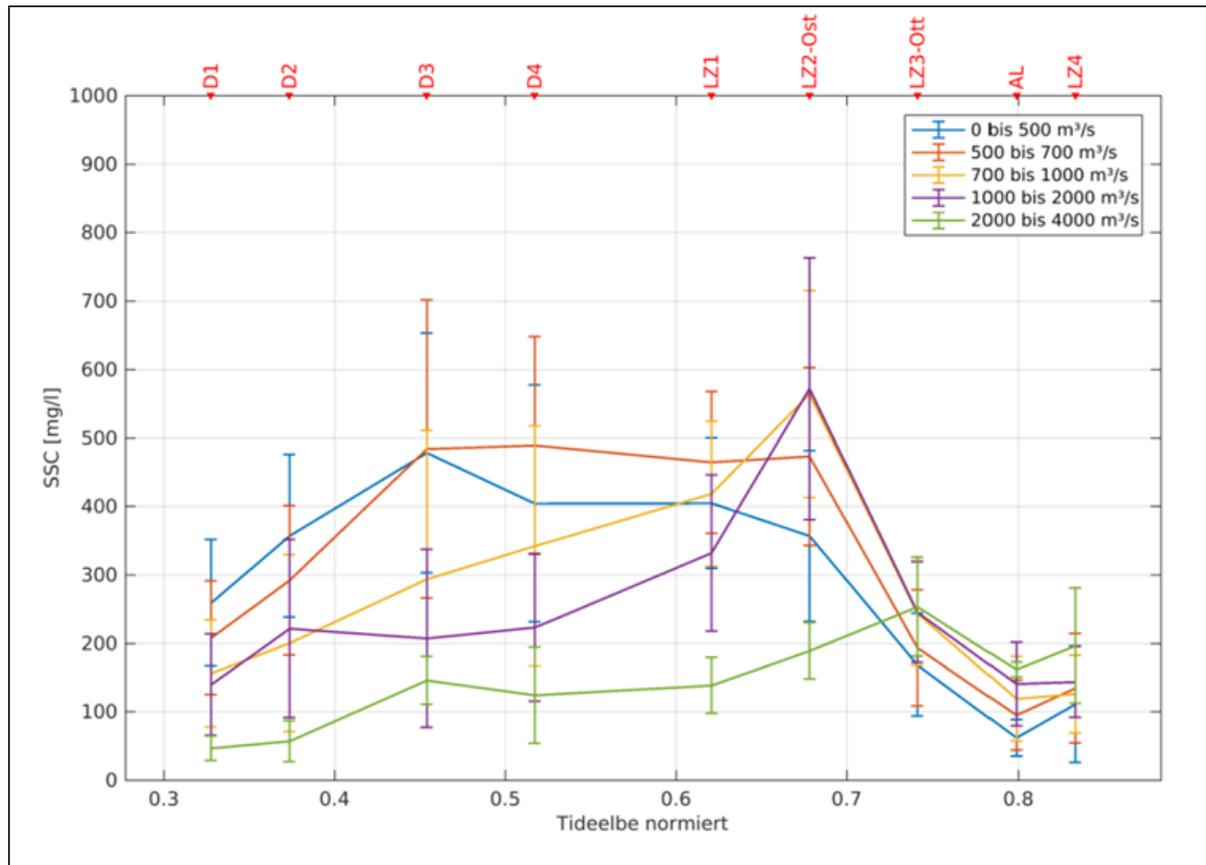


Abbildung 23: Lage der Trübungszone bei verschiedenen Abflusskategorien der Elbe (Hillmann 2017; SSC = suspended sediment concentration/Schwebstoffgehalt, hier ebenfalls aus Trübungsmessungen überschlägig errechnet und über die Wassersäule gemittelt).

Im Rahmen einer seitens TU Hamburg-Harburg, WSA Hamburg und BfG betreuten Masterarbeit (Loder 2017) wurden weitere Messdaten zu Trübung und Schwebstoffgehalt ausgewertet, um die aktuelle hydrologische Situation noch besser zu verstehen und insbesondere auch im langjährigen Vergleich besser einordnen zu können. U. a. wurden dabei Ergebnisse aus oberflächennahen Schwebstoffprobenahmen der Flussgebietsgemeinschaft FGG Elbe (Hubschrauberlängsbefliegungen) im Zeitraum 2013/2014 bis 2019 mit denen früherer Niedrigwasserperioden in 1982/86 und 1989/92 verglichen (Abbildung 24). Mit Hilfe dieser Daten kann der Gesamtverlauf in der Trübungszone über rd. 20 Messpositionen sehr gut erfasst werden. Da die Proben durch den Hubschrauber ausschließlich bei Ebbstrom und vorwiegend in Fahrrinnenmitte genommen werden, liegen die hier ermittelten Schwebstoffgehalten im Mittel unter den zuvor vorgenannten Werten (z. B. Abbildung 20, hier über Flutstrom gemittelte Werte). Im Ergebnis zeigt sich in der Niedrigwasserphase 1989/92 eine ähnliche Entwicklung wie aktuell, wobei in 2013/2014 bis 2019 vergleichsweise höhere Gehalte im Bereich Elbe-km 681,4 bis 710,0 augenfällig sind. Für 1982/1986 zeigt sich keine deutliche Entwicklung; anzumerken ist, dass das MQ4 hier knapp 90–100 m³/s höher war als in den beiden anderen Vergleichszeiträumen (vgl. Abschnitt 2.1). „Historische“ Vergleiche über die gesamte Wassersäule sind leider nicht möglich, da in der Vergangenheit kontinuierlich nur Messprogramme zur Erfassung oberflächennaher Werte, insgesamt deutlich weniger Messungen und keine Dauermessungen durchgeführt wurden.

Elbe-km	1982	1983	1984	1985	1986	1988	1989	1990	1991	1992	1993	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
636,0	52	51	60	47	45	68	54	49	51	59	64	27	41	36	58	70	45	66
639,4	72	56	24	52	33	50	38	64	86	66	85	36	47	55	80	69	54	67
642,0	42	36	24	31	24	52	37	42	46	47	60	33	69	45	52	65	64	61
645,5	61	35	23	42	22	29	31	34	64	65	67	31	47	47	54	56	34	50
649,4	72	51	34	49	32	45	31	43	96	99	93	44	46	67	84	63	59	75
650,0	94	45	37	48	32	42	39	32	54	43	68	32	46	65	62	66	62	78
653,0	75	52	36	49	21	35	33	32	57	55	81	28	39	56	57	101	89	67
655,0	90	60	50	59	33	28	31	52	122	70	128	46	58	83	63	97	71	112
660,5	124	78	83	81	53	74	82	92	115	86	164	31	120	101	124	112	76	136
662,2	170	123	68	97	60	98	114	115	186	171	188	58	84	101	163	120	108	124
662,7	149	143	92	117	77	92	103	169	273	166	273	117	162	163	117	171	89	104
665,0	174	110	96	118	57	105	86	128	166	179	232	69	202	179	202	224	163	179
670,0	122	77	55	87	50	63	61	83	131	95	149	114	196	131	128	201	147	213
674,2	155	94	44	90	56	49	58	66	101	60	144	94	98	128	107	137	73	115
675,5	219	128	162	169	158	142	127	182	184	112	271	118	164	160	233	257	86	220
681,4	158	105	132	133	119	110	128	131	154	185	248	293	294	210	273	353	130	270
689,0	155	138	147	160	103	124	116	143	216	158	212	202	212	188	251	279	111	192
693,0	111	139	104	80	50	72	69	80	57	63	89	141	124	183	129	287	109	166
704,0	61	114	99	88	82	58	87	103	66	47	81	184	146	124	178	122	52	89
710,0	84	96	71	66	66	57	75	75	71			97	95	112	98	187	165	94
721,6	90	106	66	53	54	48	58	61	57	36	68	55	78	102	65	95	82	94
727,0	102	83	71	64	63	44	65	72	69	63	67	54	84	72	54	66	49	63
Kampagnen/ Jahr	7/12	12/12	11/11	11/11	11/11	6/9	8/8	8/8	8/8	8/8	8/8	2/4	5/5	6/6	5/5	5/5	6/6	5/1fd. Jahr

Abbildung 24: Gegenüberstellung von aus Schwebstoffprobennahmen der FGG Elbe (Hubschrauberlängsbefliegungen) ermittelten Jahresmittelwerten (modifiziert nach Loder 2017 und aktualisiert bis 2019); Wertedarstellung Schwebstoffgehalt in [mg/l], Probenahme direkt an der Gewässeroberfläche; die unterste Zeile zeigt die Anzahl der Messkampagnen/Jahr (= Anzahl Hubschrauberlängsbefliegungen), aus denen die jeweiligen Mittelwerte errechnet wurden.

Eine vergleichbare Entwicklung kann auch für den Zeitraum ab Sommer 1989 nachvollzogen werden. Dieses Jahr markierte den Start einer mehrjährigen Phase mit unterdurchschnittlich niedrigen Oberwasserzuflüssen (Abbildung 2). Die in Kapitel 2.2.1 erstmals erwähnte Duplizität der Ereignisse zeigt sich hier erneut, da es an den drei Tagen vom 26. bis 28. Februar 1990 eine äußerst ungewöhnliche Folge von Sturmereignissen (zwei Orkan-, zwei Sturm- und eine Windflut) und entsprechenden Sturmflutwasserständen (NN+4,75 m bei Cuxhaven, Sturmflutarchiv der Universität Siegen) gab. Dieses Ereignis markierte damals den Beginn stark ansteigender Schwebstoffkonzentrationen in der Tideelbe (Abbildung 24), die in den Folgejahren anhielten.

2.5 Unterhaltungsbaggermengen

Abhängig vom betrachteten Gewässerabschnitt und Art der Sedimente – grobkörnige, sandige Sedimente einerseits und feinkörnige Sedimente mit einem hohen Anteil in der Feinkornfraktion < 63 µm andererseits – unterliegt die Entwicklung der Baggermengen unterschiedlichen Einflussfaktoren. Im Fokus dieses Berichtes liegt die angespannte Unterhaltungssituation in den Revieren Hamburger Hafen und dem Fahrrinnenbereich Wedel bis Julessand, welche durch einen Anstieg der Mengen an Baggergut mit hohem Feinkornanteil (bindiges Baggergut) verursacht wird (Kapitel 2.5.1 und 2.5.2). Große Mengen an bindigem Unterhaltungsbaggergut fallen zudem im Fahrrinnenbereich Osteriff, bei

der Unterhaltung der elbseitigen Vorhäfen im Nord-Ostseekanal sowie in Summe in Nebenbereichen und den zahlreichen Häfen entlang der Tideelbe an. Über die kleineren Häfen liegen keine Gesamtstatistiken für Baggermengen vor, eine vertiefte Analyse ist daher hier nicht möglich. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass der überwiegende Anteil der hier anfallenden Baggermengen lediglich lokal, häufig im Wasser-Injektionsverfahren o. ä., umgelagert wird. Aufgrund naturschutzfachlicher Auflagen der Landesbehörden und im Hinblick auf Nutzungsanforderungen (z. B. Saisonbeginn Sportboothäfen) erfolgen Räumarbeiten dabei bevorzugt zu Mitte der ersten Jahreshälfte. Die überwiegenden Mengen sandigen Baggerguts fallen in der Außenelbe stromab Medemgrund an. Die Entwicklung dieser sandigen Mengen ist nicht abhängig vom Oberwasserzufluss, sondern ist vor allem die Folge der Morphodynamik der seitlich der Fahrrinne anschließenden Watten. Eine Betrachtung zum Mündungstrichter (sandiges Baggergut) erfolgt in Kapitel 2.5.3.

Bezüglich grundlegender Beschreibungen zu Baggergutklassierung, Baggergutmengen und Unterhaltungsstrategien von HPA und WSV sei auf Entelmann und Röper (2014) sowie auf BfG (2014) verwiesen.

2.5.1 Hamburger Hafen (bindiges Baggergut)

Die Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen wird in besonderem Maße durch die Oberwasserverhältnisse geprägt. Während in den Jahren 2008 bis 2013 saisonübergreifend im Schnitt rd. 4,5 Mio. m³/a Laderaumvolumen zu baggern waren, stieg der Unterhaltungsbedarf in den Jahren nach dem Hochwasserereignis vom Juni 2013 auf bis zu 14,3 Mio. m³/a an. Auch wenn die einzelnen Baggermengen in Abbildung 25 aufgrund des unterschiedlich langen Zeitversatzes zwischen Oberwasserereignis, Sedimentation, Handlungszwang und Handlungsoption nicht direkt mit dem Oberwasserzufluss korreliert werden können, lassen sich die zu beobachtenden starken Schwankungen im Wesentlichen durch die Oberwasserrandbedingungen erklären. So bescherte der durchgehend abflussreiche Sommer 2010 wie auch die Hochwasserwelle vom Juni 2013 dem Hamburger Hafen eine besonders niedrige Sedimentationsrate und damit nur minimale Unterhaltungsbedarfe während der jeweils folgenden Wintersaison.

Dagegen spiegeln die Unterhaltungsbaggermengen der Jahre nach 2014 die durchgehend niedrigen Oberwasserrandbedingungen und den damit einhergehenden verstärkten Stromauf- und Rücktransport von der Verbringstelle Neßsand wieder. Eine weitere Anreicherung des kurzen Sedimentkreislaufs innerhalb Hamburgs konnte durch die Verbringung von rd. 10,3 Mio. m³ Baggergut zur Tonne E3 vermieden werden (weitere 1,8 Mio. sind für 2018 geplant). Dadurch konnten auch die im Winterhalbjahr benötigten Umlagerungsmengen bei Neßsand von in der Spitze 9,4 Mio. m³ auf 4,2 Mio. m³ deutlich heruntergefahren werden.

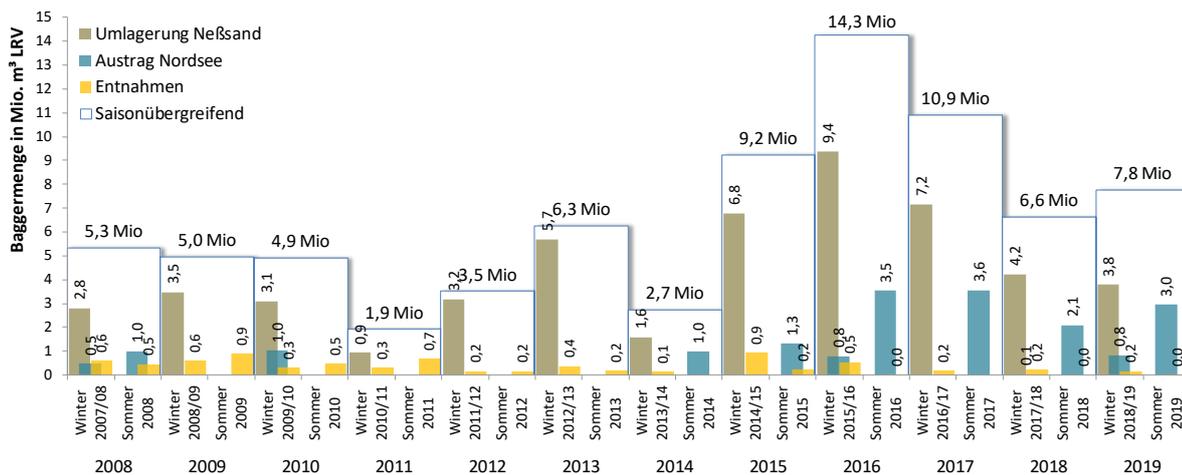


Abbildung 25: Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen pro Saison und Verbringort. (Wintersaison/Umlagersaison i.d.R. vom 07.11. bis 31.03. eines Jahres/Sommersaison vom 01.04. bis 06.11.).

2.5.2 Baggerabschnitte Wedel bis Juelsand und Osteriff (bindiges Baggergut)

Betrachtet man die WSV-Unterhaltungsbaggermengen über alle Abschnitte stromab von Hamburg bis in die Außenelbe, so ergeben sich durch die niedrigen Oberwasserzuflüsse keine erheblichen Baggermengen zunahmen. Fokussiert man sich hingegen auf die Fahrinnenbereiche Wedel bis Juelsand (sog. WSV-Baggerabschnitte 1 bis 3 = BA1 bis 3), so zeigt sich hier eine mit dem Hamburger Hafen vergleichbare Situation.

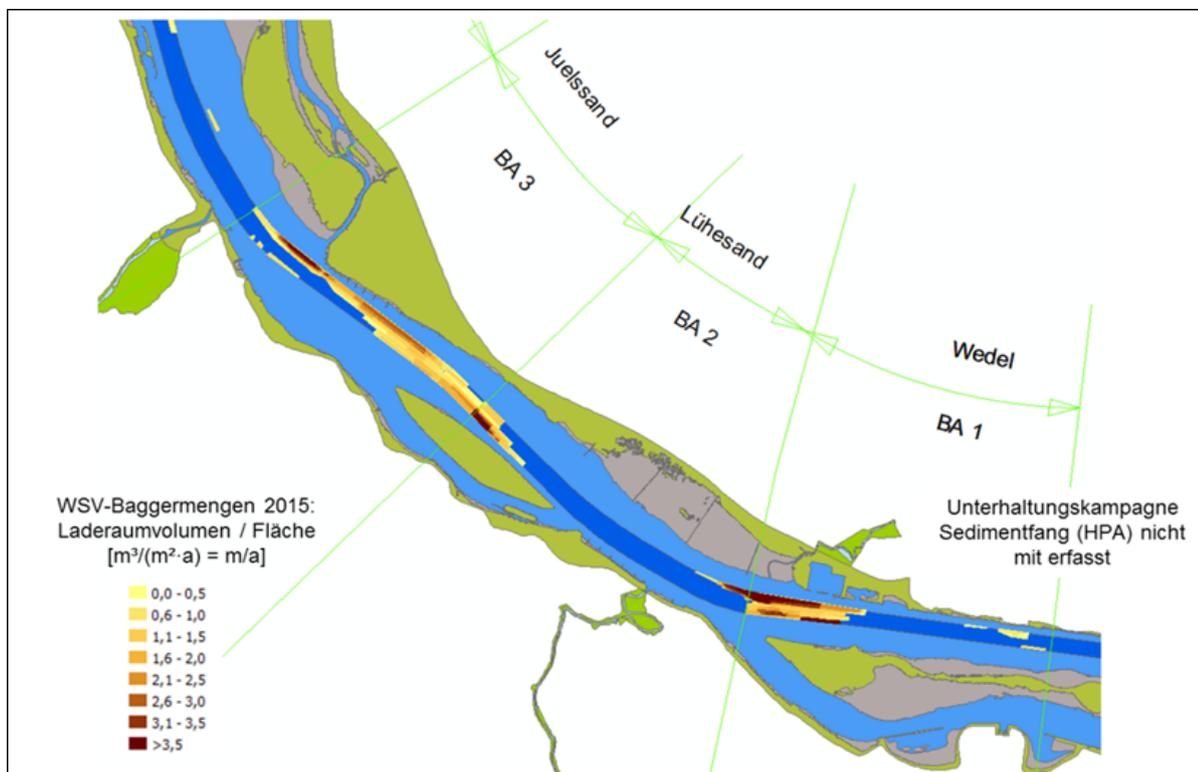


Abbildung 26: Typische Baggerbereiche zur Verkehrssicherung im Fahrinnenabschnitt BA1–BA3 (hier: 2015; HPA-Unterhaltungskampagne Sedimentfang nicht miterfasst).

Abbildung 26 zeigt, beispielhaft dargestellt am Jahr 2015, die Feinmaterialstrecken in den BA1 bis 3, in denen im Zeitraum 2011 bis 2019 regelmäßig Hopperbaggerungen erfolgten. Die Eingriffs- bzw. Sedimentationsbereiche waren bis 2015 bei langjähriger Betrachtung nahezu unverändert, d. h. die Eingriffsbereiche haben sich von Jahr zu Jahr nur geringfügig verändert. Bei dem anfallenden Baggergut handelt es sich durchweg um schluffigen Feinsand, lediglich im BA1 fällt zeitweise auch feinsandiger Schluff an.

Die WSV-Unterhaltungsbaggermengen in der Fahrrinne (nur Hopperbaggerung) betragen im Zeitraum 2013 bis 2018 in den Baggerabschnitten Wedel bis Juellssand sowie Osteriff zwischen 5,4 Mio. m³/a (2014) und 8,3 Mio. m³/a (2018). Der Mittelwert über den Zeitraum errechnet sich zu 7,3 Mio. m³/a und liegt damit über dem Mittelwert des vorangehenden Zeitraums über 5 Jahre (2008–2012) von rd. 6,2 Mio. m³/a.

Abbildung 27 verdeutlicht die jeweilige Aufteilung dieser bindigen Mengen auf die WSV-Amtsbereiche Hamburg (BA1–3) und Cuxhaven (BA12). Die Jahre mit den höchsten Oberwasserzuflüssen entsprechen den Jahren mit den geringsten Baggermengen im BA1 bis 3. Umgekehrt fallen im BA12 die Jahre 2010 und 2013 mit den höchsten Mengen Baggergut in die Zeiträume der höchsten Oberwasserzuflüsse.

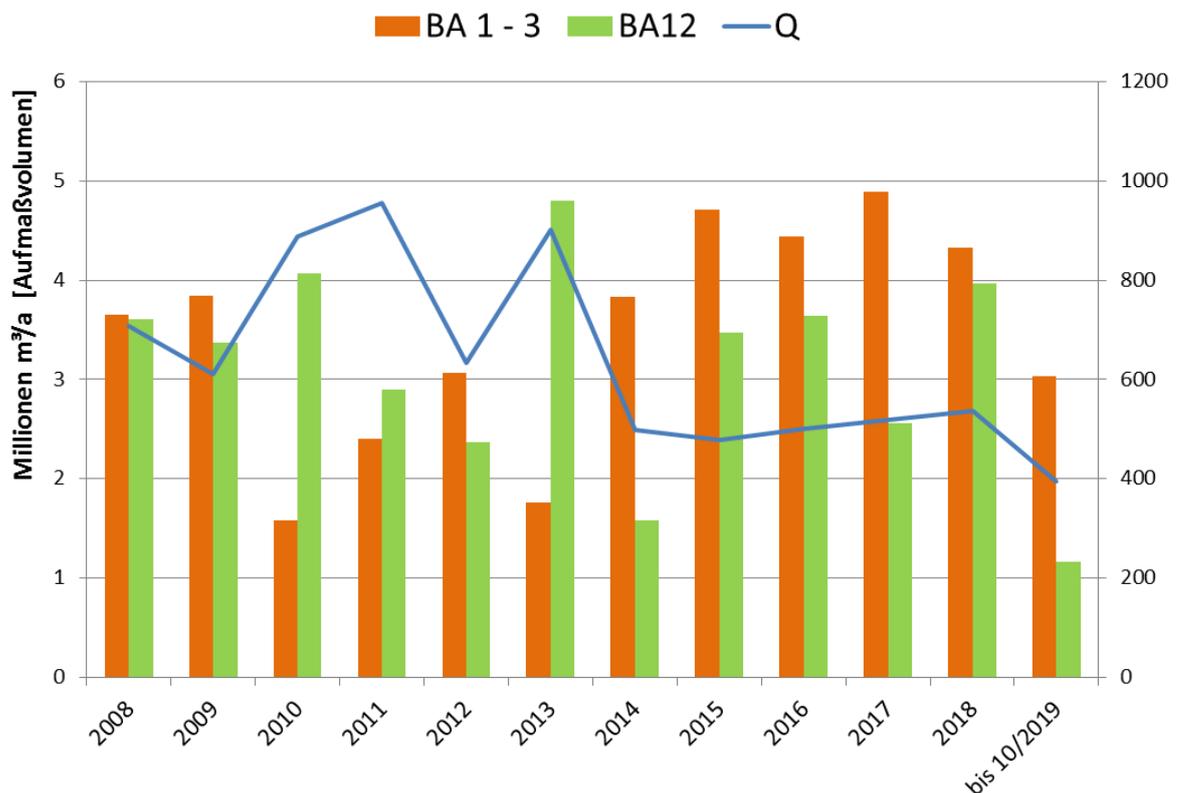


Abbildung 27: Jahresbaggermengen in den in den Feinsedimentationsstrecken Wedel bis Juellssand (BA1 - BA3) sowie Osteriff (BA12) in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss Q [m³/s].

In die Phase der anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüsse seit Sommer 2013 fallen die Jahre mit den größten Sedimentmengen, die in den BA1 bis 3 zu Unterhaltungszwecken gebaggert werden mussten. Dieses höhere Niveau an Baggermengen gegenüber den früheren Jahren korrespondiert mit dem beobachteten Anstieg bei den Schwebstoffgehalten (vgl. Abbildung 20), was wiederum maßgeblich durch die Oberwasserhältnisse bestimmt wird. Seit 2015 verharren die Baggermengen in den BA1 bis 3 auf diesem konstant hohen

Niveau, was durch die Auswertung der Sedimentationsraten (Kapitel 2.7.2) ebenfalls bestätigt werden kann.

Im BA12 können die jeweiligen Wasserstands- und Windverhältnisse bedeutender als die aktuellen Oberwasserhältnisse sein, da sie Sedimentations- und Resuspensionsprozesse auf höher gelegenen Wattflächen beeinflussen (Reiß 2015). Insgesamt sind die dem Sedimentationsgeschehen zu Grunde liegenden Prozesse am Osteriff damit noch komplexer als im Bereich Wedel bis Juelssand. Die hohen Baggermengen in 2013 sind nach derzeitigen Erkenntnissen u. a. auf durchgängig hohe Oberwasserzuflüsse zu Beginn des Jahres zurückzuführen, während das kurze Frühsommerhochwasser 2013 nicht maßgebend zu einem Baggermengenanstieg geführt hat. In 2014 waren die Baggermengen am Osteriff vergleichsweise gering, in den Jahren 2015, 2016 und 2018 spiegelt sich auch die weiter oben diskutierte grundlegende Aufstockung des Inventars an Feinsedimenten als Baggermengenanstieg wieder.

2.5.3 Mündungsgebiet (sandiges Baggergut)

Die Baggermengen im Mündungstrichter unterliegen mitunter starken Schwankungen, die jedoch kaum noch vom Oberwasserzufluss abhängig sind. Die treibenden Kräfte hier sind die täglichen starken Tideströmungen und der Seegang, der insbesondere bei Starkwindereignissen in kurzer Zeit große Sedimentmengen in Bewegung bringen kann. Die Abbildung 28 zeigt exemplarisch die typischen Baggerbereiche für das Jahr 2018. Flächenhafte Baggerarbeiten, die sich über die gesamte Breite der Fahrrinne erstrecken, sind im BA12 (Osteriff, Kapitel 2.5.2) und im Bereich der Mittelrinne (BA16 und BA17) notwendig. In den anderen Baggerabschnitten müssen lokale Untiefen beseitigt werden, die zumeist aus lateralen Eintreibungen oder dem Aufwachsen von Sohlstrukturen entstehen. Im BA14 (Altenbruch) werden am nördlichen Fahrinnenrand Eintreibungen vom Medemgrund gebaggert.

Im Mittel der letzten Jahre lagen die Baggermengen bei rund 8 Mio. m³ pro Jahr (Abbildung 29), wobei ein Großteil der Menge aus dem Osteriff stammte (Abbildung 27). Auffällig sind die hohen Baggermengen im Jahr 2008. Diese Baggermengen resultieren aus dem Durchbruch zwischen Klotzenloch und Medemrinne, was im Baggerabschnitt östliche Mittelrinne, in den der westliche Ausgang des Klotzenloches mündet, zu einer Gesamtbaggermenge von 5 Mio. m³ geführt hat. Auch die anderen Baggerabschnitte im Mündungsbe- reich weisen 2008 im Vergleich zu den Vorjahren höhere Baggermengen auf, allerdings in deutlich geringerem Maße als im Baggerabschnitt Östliche Mittelrinne.

Teile des im Abschnitt Klotzenloch-Medemrinne verloren gegangenen Sediments stehen dem Ästuar nicht mehr zur Verfügung, da in 2008f zeitweise große Anteile des Baggerguts aufgrund eingeschränkter Verbringstellenkapazitäten weiter stromab bei Elbe-km 750 am südlichen Fahrwasserrand umgelagert wurden. Nach einer Untersuchung der BAW wurde diese Unterhaltungspraxis geändert. Seitdem wird nach der Maxime gehandelt, Baggergut überwiegend am „roten Rand“ des Fahrwassers, d. h. nördlich der Fahrrinne, zu verbringen (BAW 2013). Damit soll u. a. der durch den Bau des Leitdamms Kugelbake verursachte Sedimentverlust im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer kompensiert werden, da der Leitdamm den Sedimenttransport über die Fahrrinne unterbindet. Das Leitbild ist dabei, das Mündungsgebiet in einen morphologischen Zustand zu bringen, wie er etwa um 1970 vorhanden war (Abbildung 30). Damit soll eine Verstärkung der Dämpfung der

Tideenergie im Mündungsbereich entsprechend der Ausrichtung des 2008 formulierten Strombau- und Sedimentmanagementkonzeptes von HPA und WSV erreicht werden. Dieses Handeln steht im Einklang mit neuen wasserbaulichen Sichtweisen, gewünschte natürliche morphologische Entwicklungen zu forcieren bzw. ungünstigen Entwicklungen entgegen zu wirken. Mit Hilfe der Stichworte „Building with Nature“, „Sand Motor“ oder „Mud Motor“ findet man internationale Beispiele für dieses Handeln.

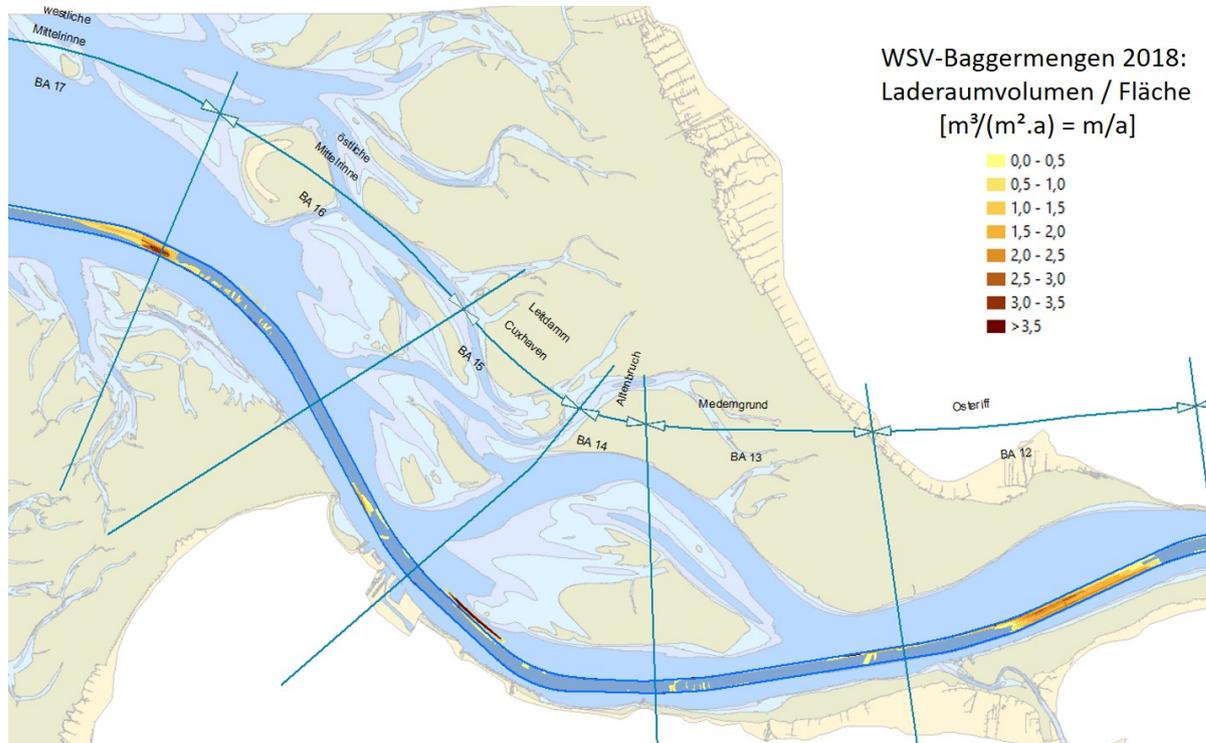


Abbildung 28: Typische Baggerbereiche zur Verkehrssicherung im Fahrrinnenabschnitt BA12–BA17 (hier: 2018).

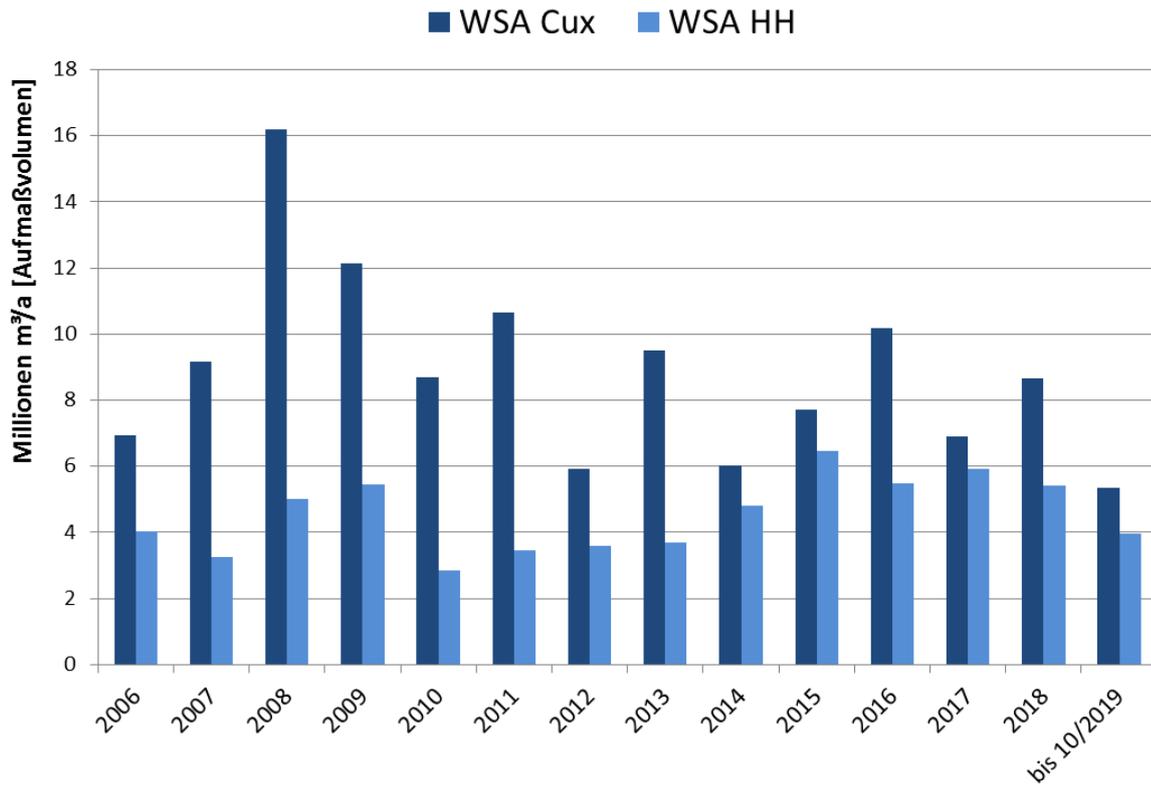


Abbildung 29: Baggermengen der WSÄ Hamburg und Cuxhaven 2006-10/2019.

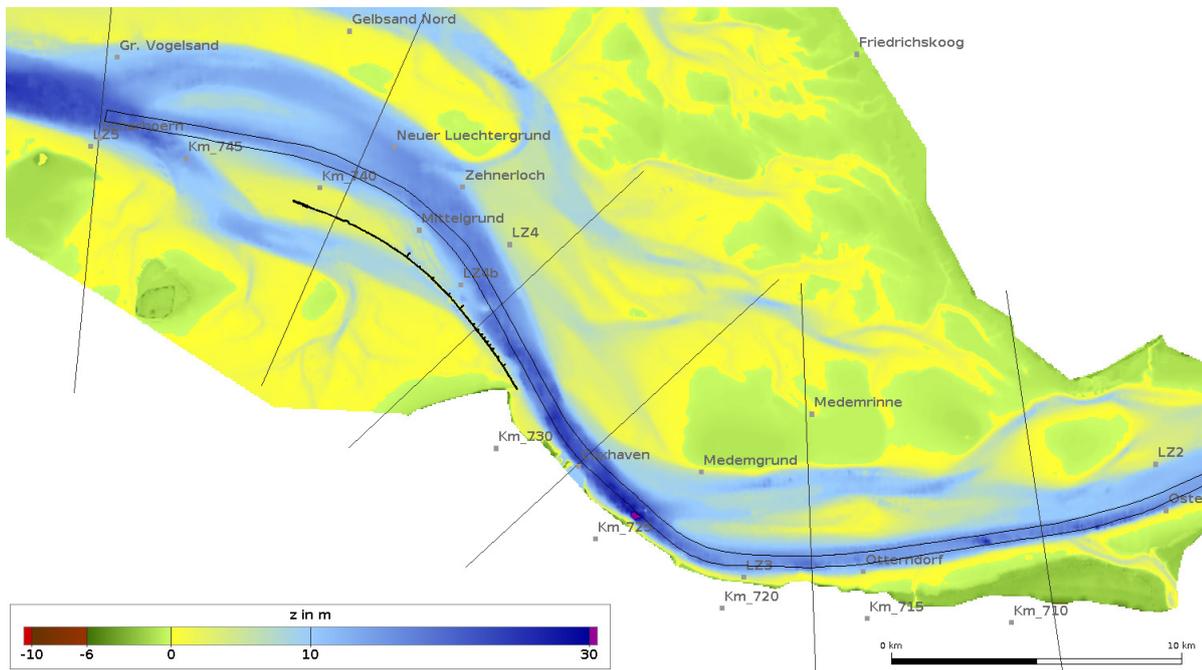


Abbildung 30: Topographie der Elbmündung, ca. 1970. Die Ortsbezeichnungen beziehen sich auf den gegenwärtigen Zustand (Abbildung 34).

2.5.4 Baggermentenentwicklung in Nebenbereichen am Beispiel des Durchstichs zur Wischhafener Süderelbe

In den Landeshäfen, Sportboothäfen etc. entlang der Tideelbe ist es in den letzten Jahren zu verstärkten Sedimentationen bzw. einem Anstieg der Baggermengen gekommen. In Bezug auf die Baggermengen fehlen aber übergeordnete Statistiken, so dass auf diesem Wege keine quantitativen Aussagen zur Entwicklung möglich sind. Während die Häfen als ortsnah an die Hauptelbe oder Nebelbe angebundene Gebiete zumeist einfache Geometrien aufweisen, sind Nebelben und Nebenflüsse komplexere Systeme, bei denen es gilt, das Systemverständnis hinsichtlich der morphodynamischen Prozesse noch weiter zu verbessern. Die Häfen werden regelmäßig geräumt, um diese betreiben zu können bzw. nautische Belange zu gewährleisten, die Nebelben und Nebenflüsse hingegen nur eingeschränkt in bestimmten Bereichen. Zur Beurteilung der morphologischen Entwicklung liegen i. d. R. nur in mehrjährigem Abstand Vermessungsdaten vor.

Im Strombau- und Sedimentmanagementkonzept Tideelbe (SSMK) wird die Minimierung der Verlandungsprozesse in Nebelben und Nebenflüssen als wichtiges Ziel benannt. Zitat (SSMK 2008): „Je mehr Bereiche im Tiderraum verlanden oder z. B. durch Eindeichungen verloren gehen, umso mehr werden Verlandungstendenzen in den oberen Abschnitten der Tideelbe verstärkt.“ Beispielhaft soll in diesem Zusammenhang kurz die besonders auffällige Baggermentenentwicklung im WSV-Baggerbereich Wischhafen beschrieben werden. In diesem Bereich muss wegen des Fährverkehrs Glückstadt – Wischhafen regelmäßig der Durchstich zur Wischhafener Süderelbe gebaggert werden. Abbildung 31 verdeutlicht zunächst einen hier seit 2013/2014 beobachteten Anstieg.

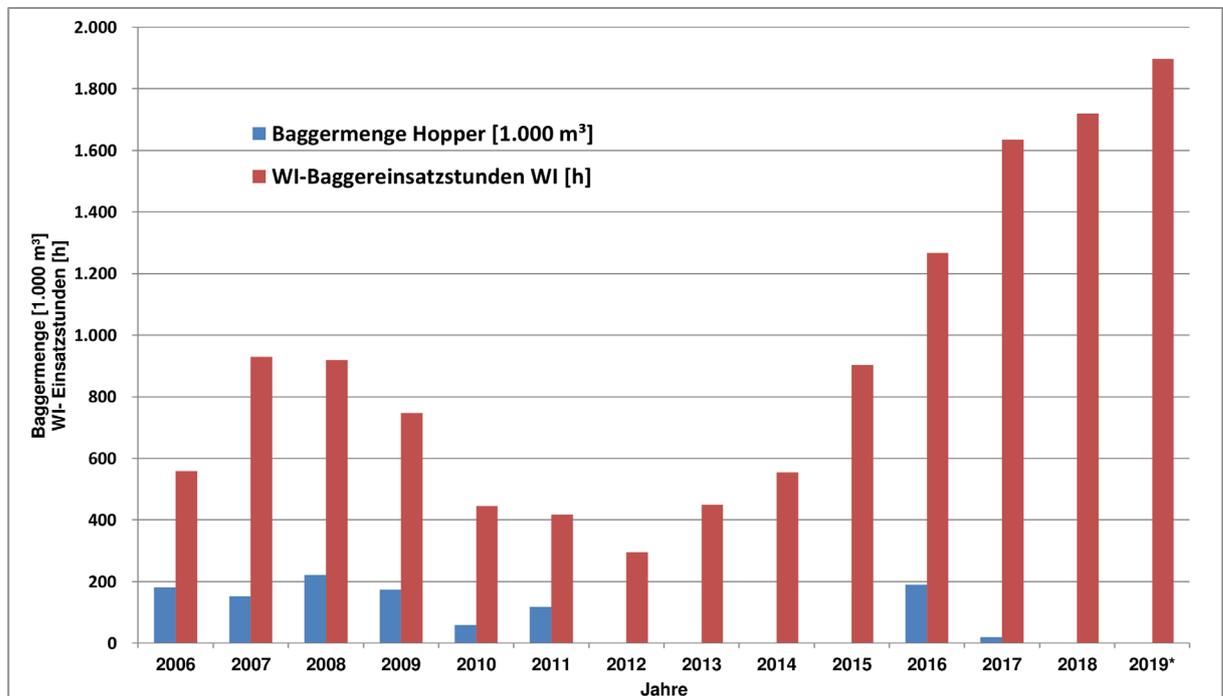


Abbildung 31: Hopperbaggermengen sowie WI-Einsatzzeiten zur Aufrechterhaltung des Fährverkehrs Glückstadt – Wischhafen. Baggermengen 2019 = Prognosewert vom Oktober 2019.

Demnach war in 2012, wahrscheinlich u. a. infolge einer Grundräumung mit einem Hopperbagger in der zweiten Jahreshälfte 2011, gegenüber dem Vorjahr 2011 kein ansteigender

Baggerbedarf zu verzeichnen, obwohl höhere Schwebstoffgehalte auftraten (Abbildung 31). In den Jahren nach 2013 zeigten sich mit Erhöhung der Schwebstoffgehalte hingegen auch kontinuierlich erhöhte *Water Injection* (WI)-Einsatzzeiten. Neben der vermehrten Verfügbarkeit von Schwebstoff spielen dabei aber auch morphologische Veränderungen eine entscheidende Rolle (Abbildung 32).

In den Jahren nach 2013 ist es zu einer deutlichen Geländeaufhöhung im Bereich des von Nord nach Süd senkrecht zur Fahrrinne verlaufendem Wischhafener Fahrwassers gekommen. Seit 2014/2015 ist dieses bei Niedrigwasser in weiten Teilen trockengefallen und nach dem DGM-W 2016 schließlich vollständig als Wattfläche zu klassifizieren (Abbildung 32). Mit abnehmender Durchströmung des Bereiches haben sich gleichzeitig Räumungseffekte im Bereich des für die Fährverbindung zu unterhaltenden Durchstichs zur Wischhafener Süderelbe reduziert. Die Verlandung des Wischhafener Fahrwassers ist grundsätzlich als langfristiger morphologischer Anpassungsprozess zu sehen, der in seinen Auswirkungen noch detaillierter zu untersuchen und zu beurteilen ist. Interessant ist im Kontext der aktuell vorgenommenen Analyse die deutlich beschleunigte Entwicklung im Zeitraum von 2013 bis 2016. Grundsätzlich ist von einer dauerhaften Verlandung auszugehen, der nur durch Baggermaßnahmen begegnet werden kann.

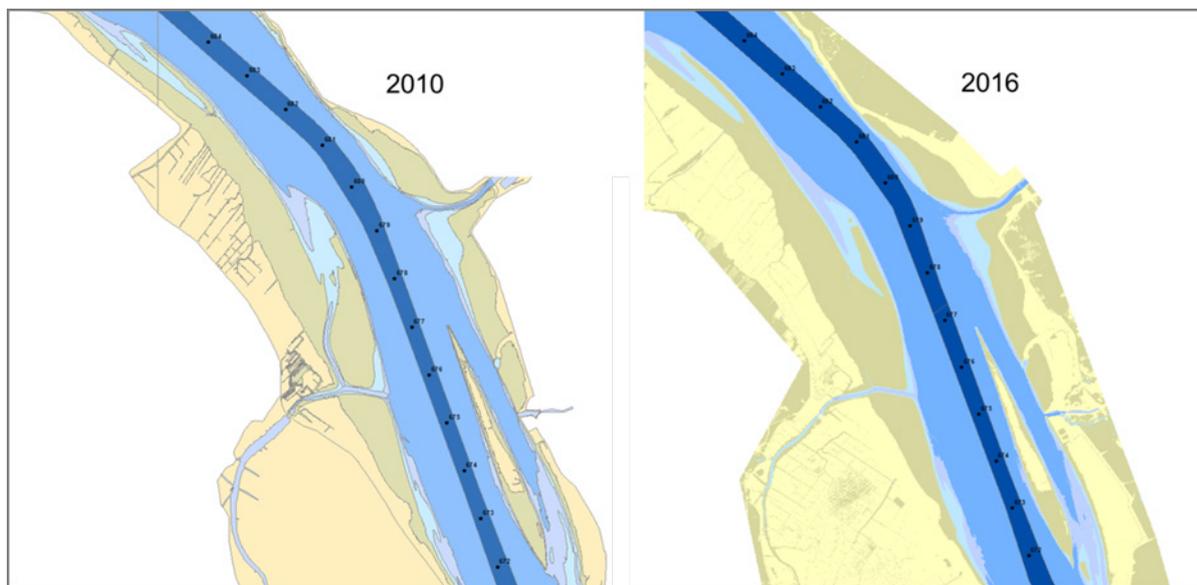


Abbildung 32: Entwicklung von Wattflächen (Darstellung in dunkelbeige) im Bereich Wischhafen (klassifizierte Darstellung auf Grundlage des DGM-W 2010 und des DGM-W 2016).

Auch in anderen Nebenbereichen waren hohe Sedimentationsraten zu beobachten. Grundsätzlich sind die einzelnen Nebenflüsse und Nebenelben jedoch gesondert zu betrachten. So zeigen z. B. die Lühesander Süderelbe und Glückstädter Nebenelbe als „kurze Nebenelbensysteme“ bereits seit Jahrzehnten morphologisch nahezu unveränderte stabile Verhältnisse mit Schwankungen in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen. Andere Bereiche, wie z. B. der beschriebene Bereich Wischhafener Fahrwasser/Brammer Bank oder auch das Gebiet Hahnöfer Nebenelbe/Mühlenberger Loch, zeigen kontinuierliche Verlandungstendenzen, die sich in Phasen mit niedrigen Oberwasserzuflüssen und damit hohen Schwebstoffgehalten verstärken.

2.6 Morphologie

2.6.1 Morphologische Veränderung von 2010 bis 2016 – Überblick

Anhand der DGM-W der Jahre 2010 und 2016 kann mit Hilfe von Differenzdarstellungen ein erster Überblick über die großräumigen morphologischen Veränderungen gegeben werden. Dazu sind zunächst in der Abbildung 33 die Topographie im Mündungsgebiet des Jahres 2010 und der Abbildung 34 die des Jahres 2016 dargestellt. Die Ortsbezeichnungen und die Markierungen der Baggerabschnitte erleichtern die Orientierung und den Vergleich. Am auffälligsten ist die Entwicklung der Medemrinne, die im Jahr 2016 länger gestreckt ist als im Jahr 2010 und nicht mehr westlich des Medemgrundes vor Cuxhaven in das Fahrwasser mündet, sondern weiter stromab.

Das Mündungsgebiet weist insgesamt eine hohe morphologische Aktivität auf. Dies ist deutlich erkennbar, wenn die Differenzen zwischen den beiden Datensätzen gebildet werden. In der Abbildung 35 ist das Ergebnis dargestellt. Bereiche, die im Jahr 2016 eine höhere Sohllage aufweisen (Deposition), sind rot dargestellt, die tieferliegenden Bereiche blau (Erosion). Die Migration von Rinnen, z. B. die Bewegung nordwärts des östlichen Teils der Medemrinne, ist an dem stets aneinander angrenzenden Muster von Erosion/Deposition zu erkennen. Das Aufwachsen des Medemgrundes insbesondere im westlichen Bereich ist sehr markant, wie auch die Aufhöhung des Fahrwassers vor Cuxhaven, die auch durch die Verlagerung der westlichen Mündung der Medemrinne verursacht wird. Südöstlich des Neuen Luechtergrundes ist ebenfalls ein Aufwachsen zu erkennen. Dieser Bereich wird auch durch die Sedimente genährt, die am Neuen Luechtergrund umgelagert werden.

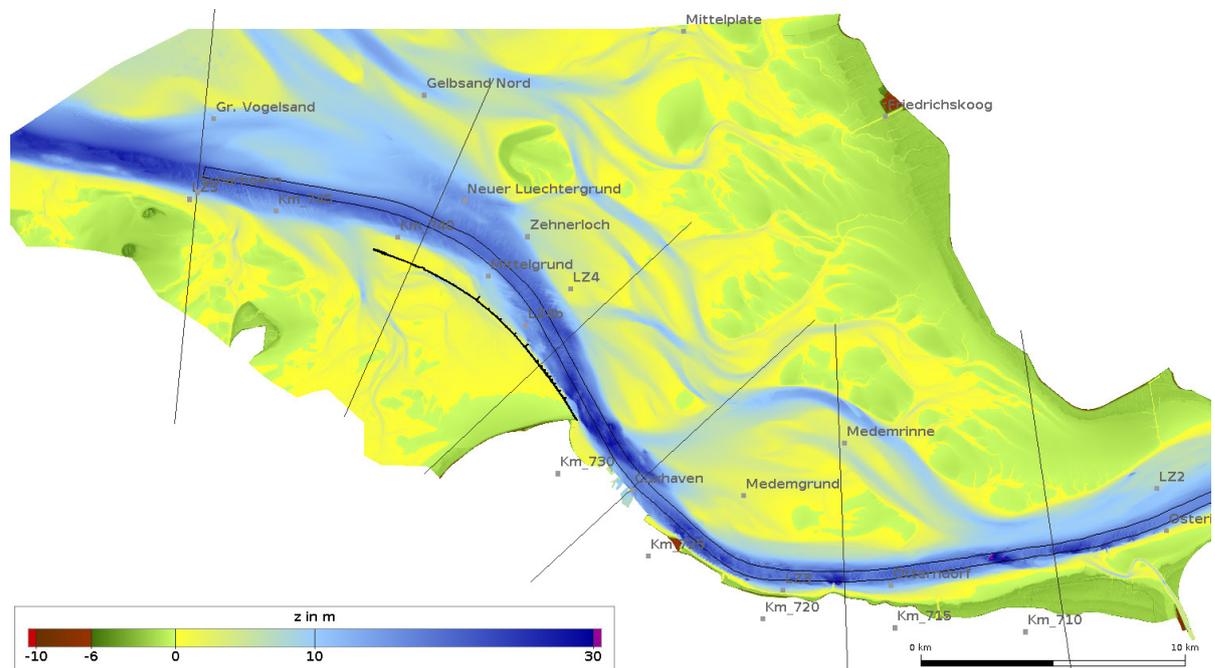


Abbildung 33: Topographie 2010 im Mündungsgebiet.

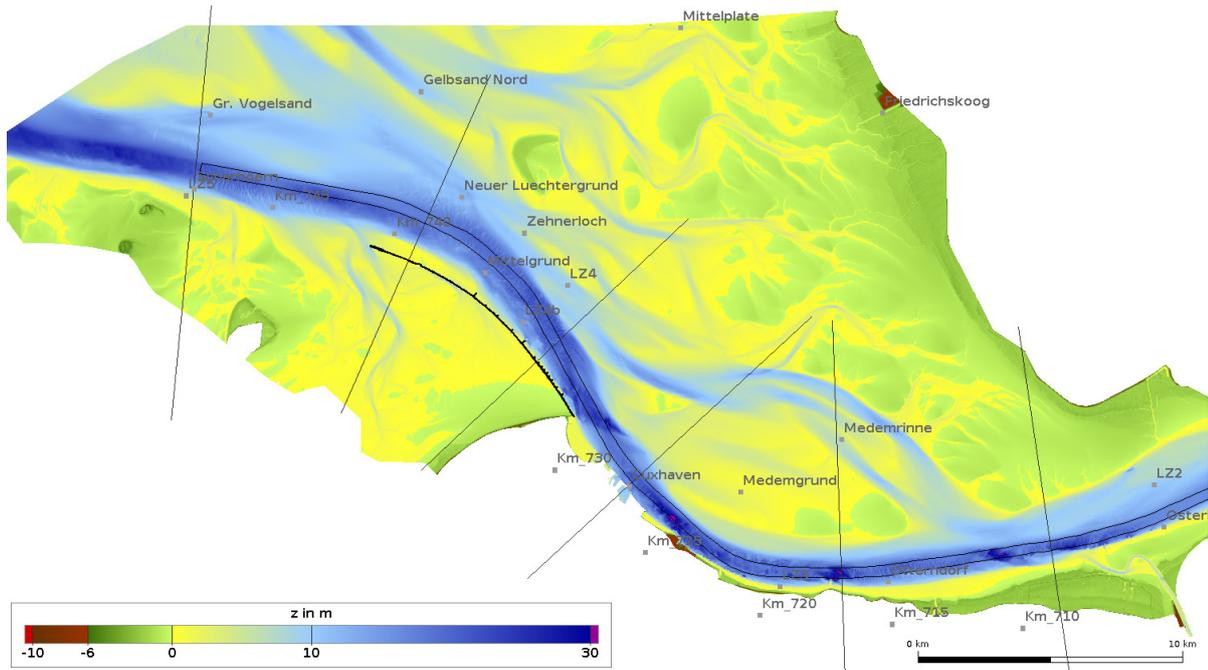


Abbildung 34: Topographie 2016 im Mündungsgebiet.

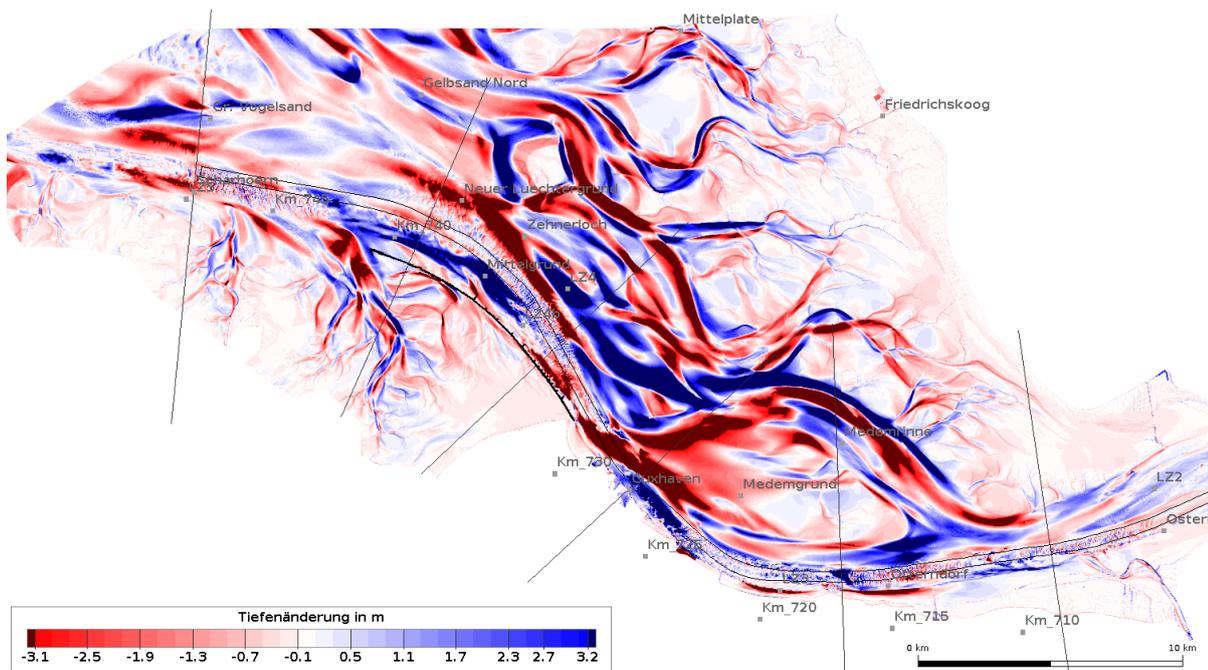


Abbildung 35: Differenztopographie 2010–2016. Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Weitere Abschnitte der Tideelbe sind in Abbildung 36 und in Abbildung 37 jeweils als Topographie des Jahres 2016 und der Differenztopographie zu 2010 dargestellt. Neben den ausgeprägten Veränderungen im Mündungsbereich gibt es weiter stromauf eine Verflachung in mehreren Nebenbereichen. Besonders auffällig ist dabei der südliche Gewässerbereich zwischen St. Margarethen und Wischhafen (vgl. Kapitel 2.5.4). Auch der Verbringbereich an der Amtsgrenze nahe St. Margarethen (Elbe-km 689) ist in der Differenzdarstellung gut zu erkennen (Abbildung 36). Ein Zusammenhang zwischen dem Verbringen von Baggergut bei Elbe-km 689 und dem Aufwachsen der Topographie im Bereich der Brammer Bank stromab von Elbe-km 675 liegt nahe.

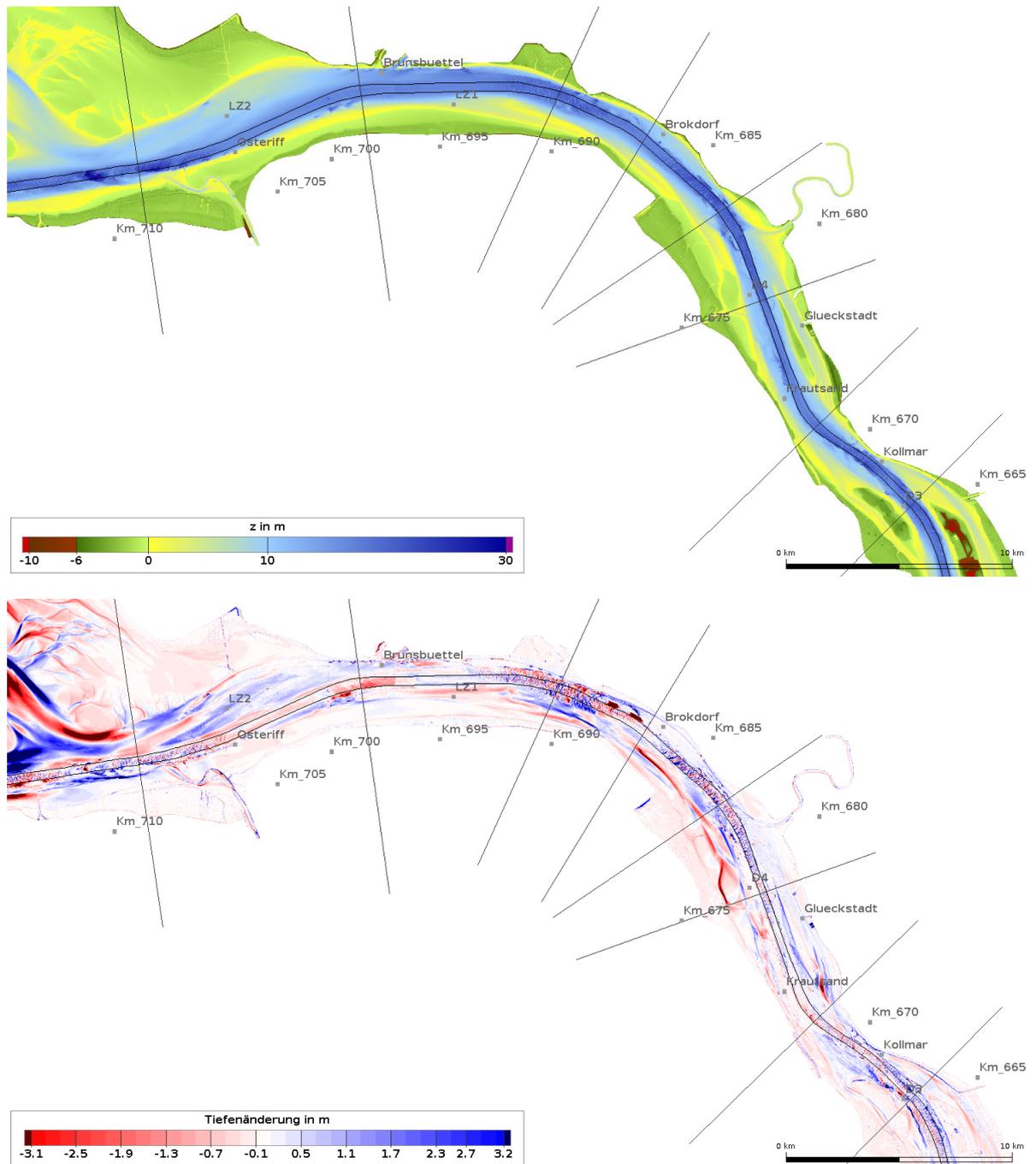


Abbildung 36: Topographie 2016 (oben) und Differenztopographie 2010–2016 (unten). Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

In den Nebelnelben sind ebenfalls überwiegend Depositionszonen zu erkennen, die in den weiter stromauf gelegenen Bereichen stärker ausgeprägt sind. In den an die Fahrrinne angrenzenden Bereichen sind hingegen in einigen Strecken schmale Erosionszonen zu erkennen.

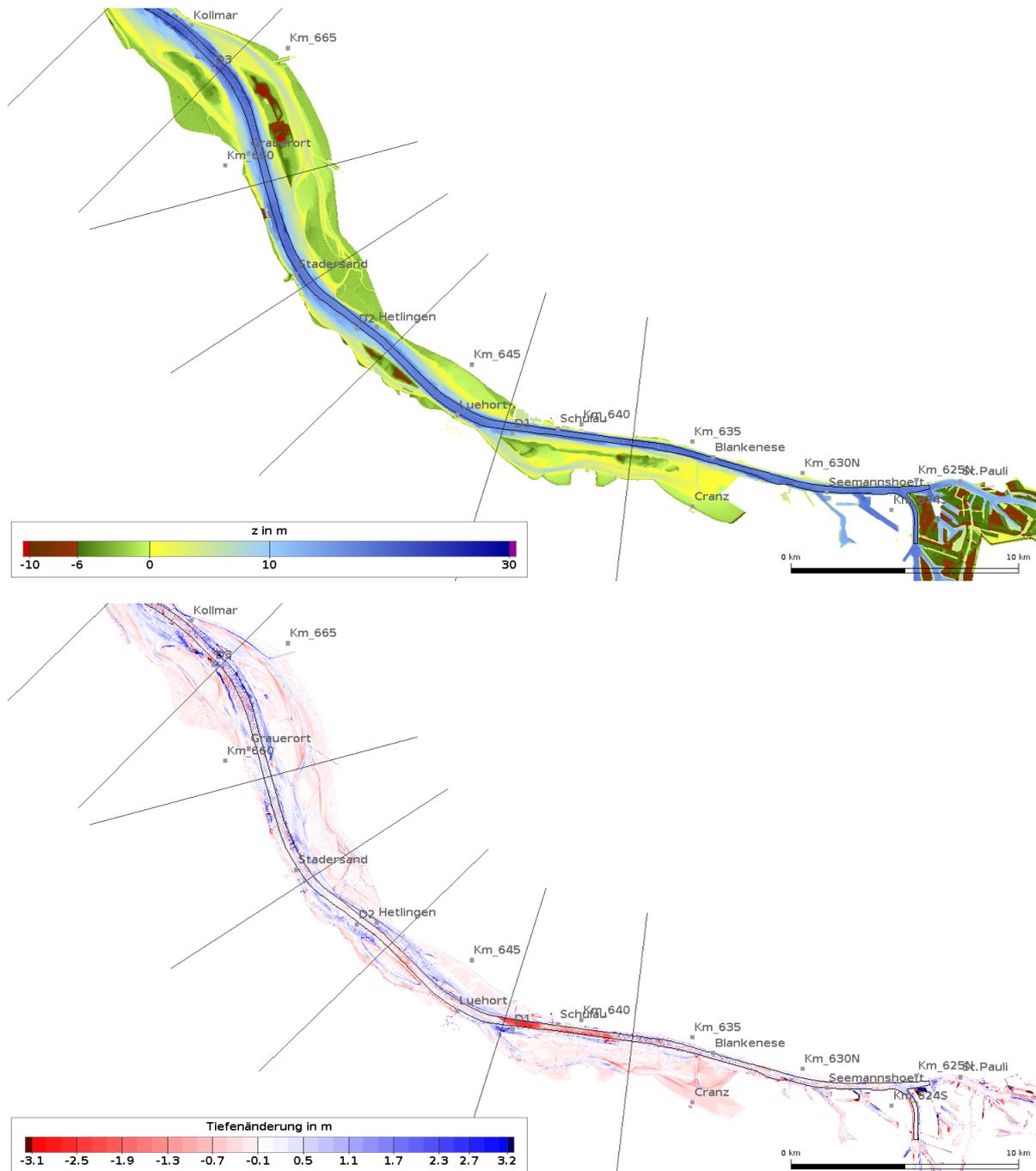


Abbildung 37: Topographie 2016 (oben) und Differenztopographie 2010–2016 (unten). Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Mit Hilfe einer Volumenanalyse kann dieser optische Eindruck konkretisiert werden. da für die Baggerabschnitte 1 bis 10 (BA1 bis BA10) eine vorwiegend erosive Tendenz im Fahrrinnenbereich sowie in den angrenzenden Fahrwasserrändern im Bereich zwischen Tonnenstrich und der 8 m-Linie festgestellt wird (Abbildung 38). Lediglich der Baggerabschnitt 10, in dessen Randbereich sich mehrere Verbringstellen befinden, weist eine positive Sedimentbilanz auf. Der Auftrag im Fahrrinnenbereich in den BA1 und BA2 ist nur temporär gegeben, hier befindet sich der regelmäßig gebaggerte Feinsedimentationsbereich Wedel und der Sedimentfang Wedel. Relevant ist hier vor allem die Betrachtung der weiter stromab gelegenen sandig geprägten Fahrrinnenbereiche (BA4 bis BA9). Insgesamt ist der

hier bilanzierte Bereich voluminöser geworden. Dies wird durch Untersuchungen des WSA Hamburg zur morphologischen Entwicklung im Fahrwasserbereich zwischen Elbe-km 638,9 und 689,1 bestätigt, für die halbjährliche Peilungen im Zeitraum von 2008 bis 2014 herangezogen wurden (WSA Hamburg 2016).

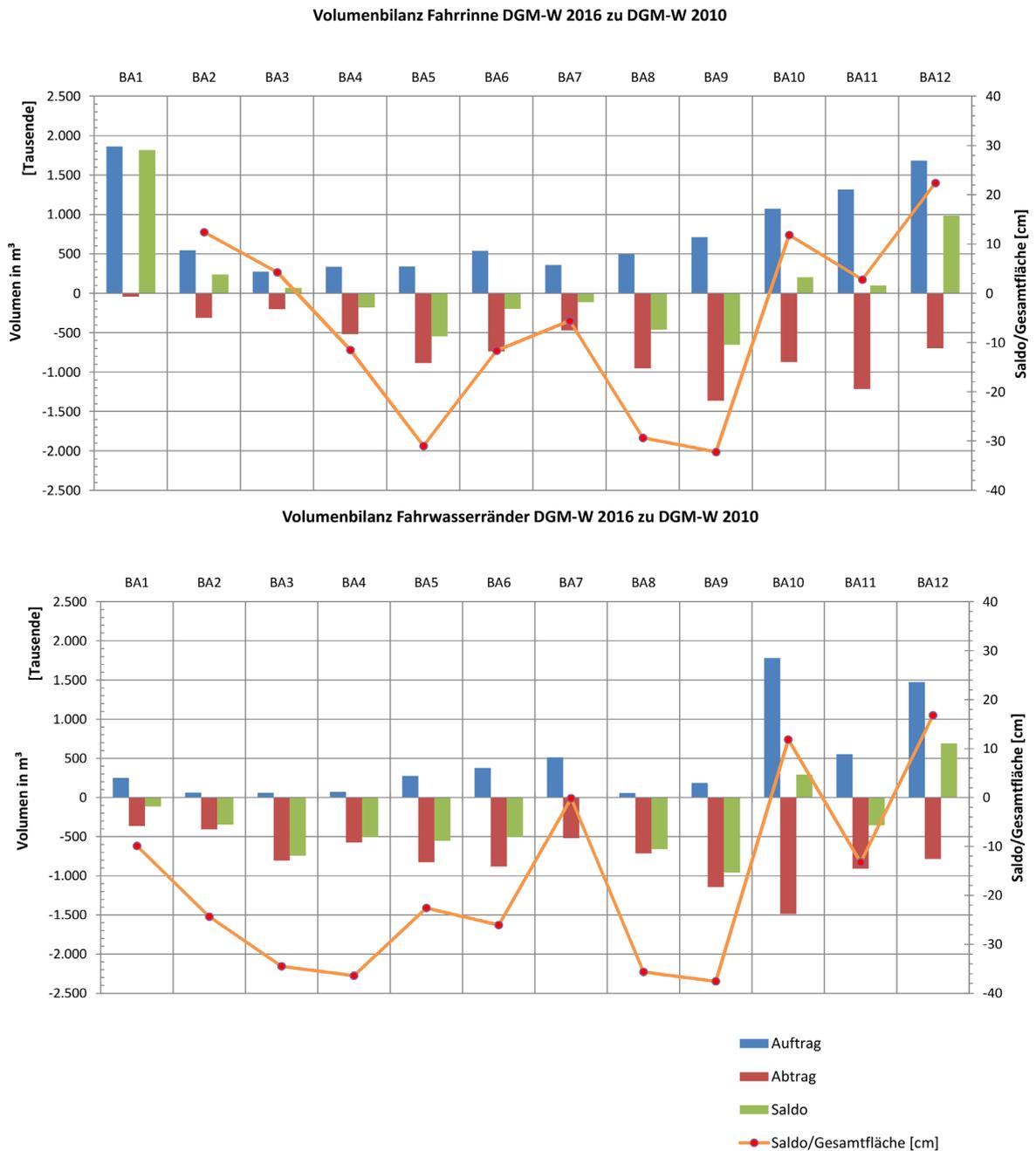


Abbildung 38: Differenzberechnungen DGM-W 2016 zu DGM-W 2010 (oben: Fahrrinne, unten: Fahrwasserrand, d. h. Bereich zwischen Tonnenstrich und 8 m-Linie (BA1 bis BA10) bzw. 10 m-Linie (BA11 bis BA12)).

2.6.2 Morphologische Veränderung der Hamburger Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese 2010 zu 2016

In den letzten Jahren wurde in Teilabschnitten der Unterelbe eine langsam fortschreitende Erosion beobachtet. Die damit einhergehende sukzessive Vertiefung der mittleren Sohlage

konzentriert sich dabei insbesondere auf Gewässerabschnitte mit sandiger Sohle, die durch die Ausbildung von Großriffeln bzw. Unterwasserdünen geprägt sind. Eine mögliche Folge dieser Entwicklung ist neben der Tieferlegung der wirksamen Sohle auch eine Schwächung der sandigen Transportkörperstrukturen an der Gewässersohle.

Im Hamburger Bereich gibt es eine bedeutende Transportkörperstrecke (Riffelstrecke) von der westlichen Landesgrenze ab Elbe-km 639, nördlich der Verbringstelle Neßsand bis etwa auf Höhe von EADS bei Elbe-km 633.

Bei dem Vergleich des DGM-W 2010 mit dem DGM-W 2016 wird die Schwächung der Transportkörperstrukturen deutlich. Im Schummerungsplan des DGM-W 2010 (Abbildung 39) ist eine deutlich erkennbare sub-aquatische Riffel- und Dünenstruktur über den gesamten Abschnitt zu beobachten. Die subaquatischen Dünen und Riffel dehnen sich insbesondere im Bereich der Landesgrenze (Elbe-km 639) bis Elbe-km 636 – zum größten Teil – über den gesamten Fahrrinnen-Querschnitt aus. Ab Elbe-km 636 verlieren die Riffel an Steilheit und sind über den Querschnitt geschwungener.

Die klar erkennbare Dünen- und Riffelstruktur ist im Schummerungsplan des DGM-W 2016 (Abbildung 40) nicht mehr eindeutig detektierbar. Zu erkennen ist, dass insbesondere im Bereich der Landesgrenze (Elbe-km 639), direkt nördlich der Klappstelle Neßsand starke morphologische Veränderungen stattgefunden haben und die Riffelstruktur verschwunden ist. Ein wenig stromauf zwischen Elbe-km 638 und 637 ist die Riffelstruktur im DGM-W 2016 am stärksten ausgeprägt, obgleich die Riffelstruktur im DGM-W 2010 für diesen Abschnitt weitaus ausgeprägter war. Die Wellentäler sind eindeutig länger geworden. Die Riffel im Bereich zwischen Elbe-km 636 und 633 sind noch flacher und geschwungener als im DGM-W 2010.

In Abbildung 41 ist der Differenzenplot der DGM-Ws 2010 zu 2016 dargestellt. Gelbe, orange sowie rote Bereiche deklarieren Sedimentations- und blaue Erosionsbereiche. In dieser Darstellung wird deutlich gezeigt, dass entlang der Riffelstrecke die orange-roten Bereiche den blauen Bereichen deutlich überlegen sind. Daraus folgt, dass neben der natürlichen Dünen- und Riffeldynamik/Wanderung sich in den letzten Jahren weitere Sedimente entlang der Riffelstrecke abgelagert haben und die natürliche Dünen- und Riffelstruktur in ihrer Ausprägung geschwächt haben.

Weitere Analysen von Längsprofilen zeigen, dass im Jahr 2015 erstmals eine Auflösung der Riffelstrecke an der Landesgrenze im Abschnitt Elbe-km 639 bis 638,7 zu beobachten ist. Ähnlich wie im angrenzenden BA1 des WSA Hamburg ist davon auszugehen, dass die Dünenkämme von Feinmaterial überlagert wurden, auch eine Beeinflussung von der angrenzenden Verbringstelle Neßsand ist nicht auszuschließen. Diese Entwicklung der Riffelstrecke schreitet bis 2017 voran, danach zeigt die Überlagerung von Feinmaterial zurückgehende Tendenzen. Ein Zurückkommen der in den Vorjahren verlorengegangenen Dünen- und Riffelstrukturen ist zwar zum Teil zu erkennen, dennoch zeigen weiterführende statistischen Auswertungen der Transportkörperstrecke, dass die Anzahl der Transportkörper im Vergleich von 2009 zu 2019 von etwa 150 auf 110 abgenommen haben. Zudem beträgt und verbleibt die mittlere Transportkörperhöhe auf einem grundsätzlich stabilen Niveau von etwa 1,2 m, während sich die mittlere Transportkörperlänge messbar von etwa 30 m auf 40 m verlängert hat.

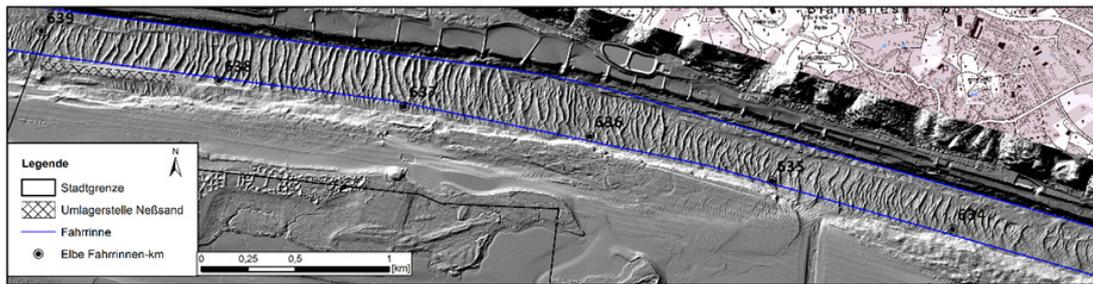


Abbildung 39: DGMW-2010 Schummerungsplan im Bereich der Hamburger Riffelstrecke.

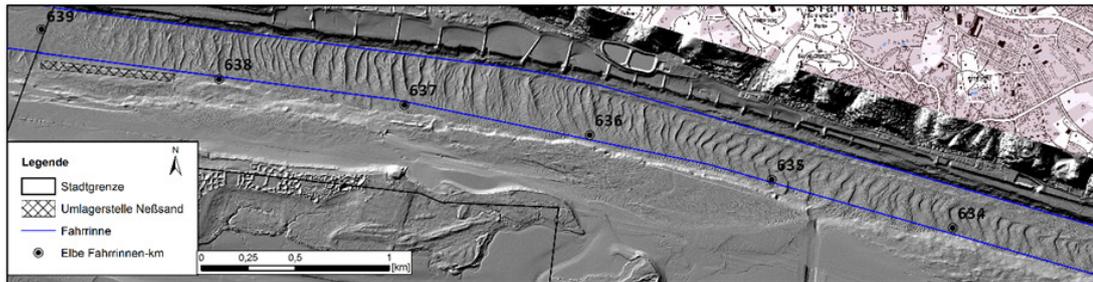


Abbildung 40: DGMW-2016 Schummerungsplan im Bereich der Hamburger Riffelstrecke.

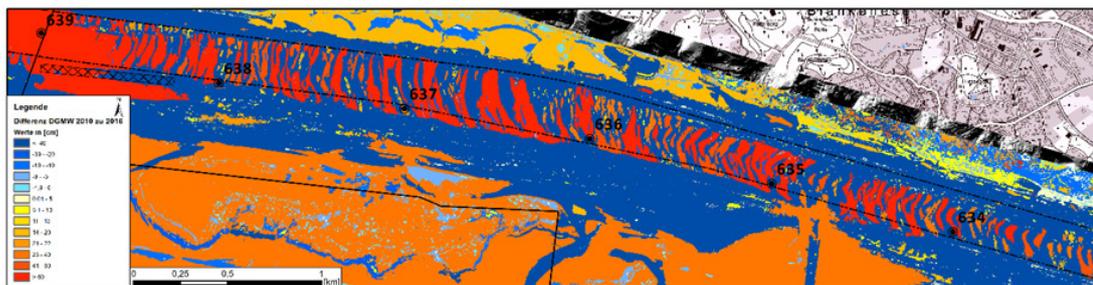


Abbildung 41: Differenzendarstellung DGM-W 2010 zu 2016 im Bereich der Hamburger Riffelstrecke. Tiefenwerte in [cm].

2.6.3 Morphologische Veränderung Elbe-km 641,8 bis 638,9 (Landesgrenze) von 2010 bis 2019

Während sich Eingriffs- und Sedimentationsbereiche im Zuständigkeitsbereich der WSV zwischen Wedel bis Juelssand, angefangen im Jahr 2010 bis zum Jahr 2015, langjährig kaum verändert haben, sind seitdem – analog zu den Veränderungen im angrenzenden Bereich der Delegationsstrecke – morphologische Veränderungen im Fahrrinnenbereich, konkret im Bereich Elbe-km 641,8 bis 638,9 (Landesgrenze) zu beobachten. Abbildung 42 verdeutlicht die Entwicklung in der Fahrrinnenmitte anhand von fünf ausgewählten Längsprofilen aus den Jahren 2010, 2014, 2015 (jeweils erzeugt aus Fahrrinnenpeilung August) sowie 2017 (erzeugt aus Fahrrinnenpeilung Mai) und 2019 (wiederum erzeugt aus Fahrrinnenpeilung August). Der Bereich Sedimentfang (Elbe-km 641,8 bis 643,8) steht dabei nicht im Fokus, hier befindet sich der Hauptbaggerbereich im Fahrrinnenabschnitt bei Wedel und es werden Vorratsbaggerungen bis zu 2 m unter Solltiefe durchgeführt.

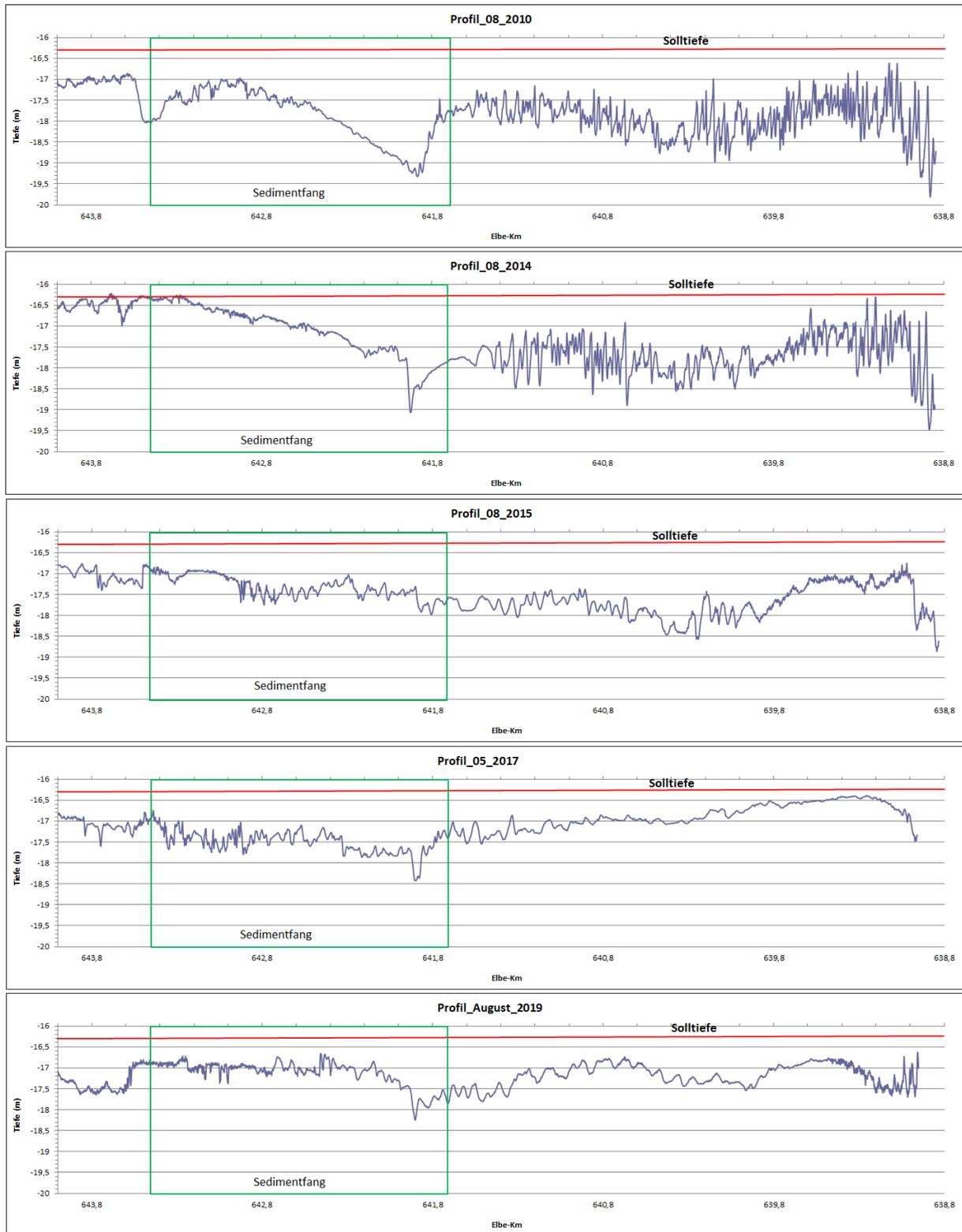


Abbildung 42: Längsprofile in der Fahrrinnenmitte im Bereich Wedel (Peilungen 2010, 2014, 2015, 2019 jeweils August sowie Peilungen vom Mai 2017).

Zwischen 2010 und 2014 zeigten sich aus Fahrrinnenpeilungen erzeugten Längsprofilen stromauf von km 641,8 nur wiederkehrende Variationen in der Riffel-/Dünen-Dynamik (insb. Variation der Riffel-/Dünenamplituden, im Detail ersichtlich aus weiteren im Zeitraum vorliegenden Peilungen), eine Erhöhung der Gewässersohle erfolgte nur phasenweise,

sehr langfristig und in geringem Umfang. Die subaquatischen Dünen erreichten in diesem Zeitraum maximale Höhen von bis zu zwei Meter und zeigten eine vorherrschende stromaufgerichtete Geschiebetransportrichtung. Überschreitungen der Sohltiefe von 16,30 m NHN (rote Linie) traten nur in Form von Einzeluntiefen auf, die Beseitigung dieser Untiefen erfolgte vorrangig mit Hilfe von WI-Einsätzen.

Im Sommer 2015 zeigte sich hingegen erstmals eine Auflösung der Riffelstrecke am stromaufseitigen Ende des BA 1. Es ist davon auszugehen, dass die Dünenkämme von Feinmaterial überlagert wurden, die Tiefenmessung/Detektion des Gewässerbodens ist ab diesem Zeitpunkt zeitweise erschwert (BfG 2017). Die Entwicklung schritt bis Mitte 2017 voran, wobei das entsprechende Längsprofil in Abbildung 42 verdeutlicht, dass es zu einer Ausweitung des überdeckten Riffelstreckenbereichs bis stromab von Elbe-km 640,8 gekommen ist. Mittels Analyse von zeitlich höher aufgelösten Daten zu Sedimentationsraten konnte diese Entwicklung nachvollzogen und in einen unmittelbaren Wirkungszusammenhang mit der Umlagerung von großen Baggergutmengen auf die benachbarte Stelle Neßsand gebracht werden (siehe Kapitel 2.7.2). Während 2010 noch rd. 35 % des Sohlflächenbereiches stromauf des Sedimentfangs durch Riffel-/Dünenstrukturen gekennzeichnet waren, sind ab August 2015 in Schummerungsplänen kaum noch entsprechende Strukturen zu erkennen. Es muss zunächst davon ausgegangen werden, dass infolge der außerordentlich großen Baggergutmengen, die ab 2015 auf der VS Neßsand verbracht wurden (Abbildung 25), die vermehrt zur Verfügung stehenden Schwebstoffe als Suspensionsfracht in den ehemals vorhandenen Dünen-/Riffeltälern sedimentiert sind und von neuen Schwebstoffen überlagert wurden. Nach und nach ist es dann zu einer Verdichtung und Konsolidierung dieser Feinsedimente gekommen, dazu hat die Widerstandsfähigkeit gegenüber den angreifenden Strömungskräften und die Erosionsbeständigkeit zugenommen. Eine ähnliche Entwicklung wurde in der Vergangenheit im Bereich des Sedimentfangs Wedel, der vormals ebenfalls durch Dünenstrukturen gekennzeichnet war, beobachtet. Allerdings ließen sich die entsprechenden Veränderungen hier nur unvollständig rekonstruieren, da im damaligen Zeitraum lediglich Linienpeilungen mit deutlich geringerer Datendichte durchgeführt wurden.

Seit 2018 haben sich im Bereich der Riffelstrecke wieder geringfügige Riffelstrukturen entwickelt (Abbildung 42). Aufgrund mehrerer Einsätze eines Hopperbaggers ist der Bereich zudem etwas tiefer als im Mai 2017. Ein Zustand, wie er im Zeitraum vor 2015 vorherrschte, hat sich jedoch nicht wiedereingestellt.

Eine Abnahme der subaquatischen Dünen- und Riffelstrukturen zeigt sich in den WSV-Fahrrinnenbereichen nicht nur im Streckenbereich Elbe-km 641,8 bis 638,9, sondern auch in den angrenzenden weiter stromab gelegenen Baggerabschnitten Lühesand und Juellssand. Dies wird aus der nachfolgenden Abbildung 43 deutlich. Für die Darstellung wurden die Flächenanteile von Dünenstrukturen (rot), Riffelstrukturen (grün) sowie Bereichen mit geringen Strukturen (grau) innerhalb der Fahrrinne im DGM-W 2010 und im DGM-W 2016 ausgewertet. Die Darstellung zeigt die prozentualen Änderungen von 2016 gegenüber 2010. Eine deutliche Abnahme von Dünen- und Riffelstrukturen zeigt sich damit vor allem in den Hamburg-nahen Baggerabschnitten, die Abnahmen weiter stromab bis Brokdorf (Bereich BA8) sind deutlich geringer und liegen ggf. im Bereich natürlicher Schwankungen. Analysen für den Bereich Brunsbüttel bis Außenelbe (hier nicht dargestellt) zeigen demgegenüber keine entsprechende Abnahme, vielmehr nehmen die groben

Strukturen im Außenelbereich beim Vergleich DGM-W 2016 zu DGM-W 2010 z. T. sogar deutlich zu.

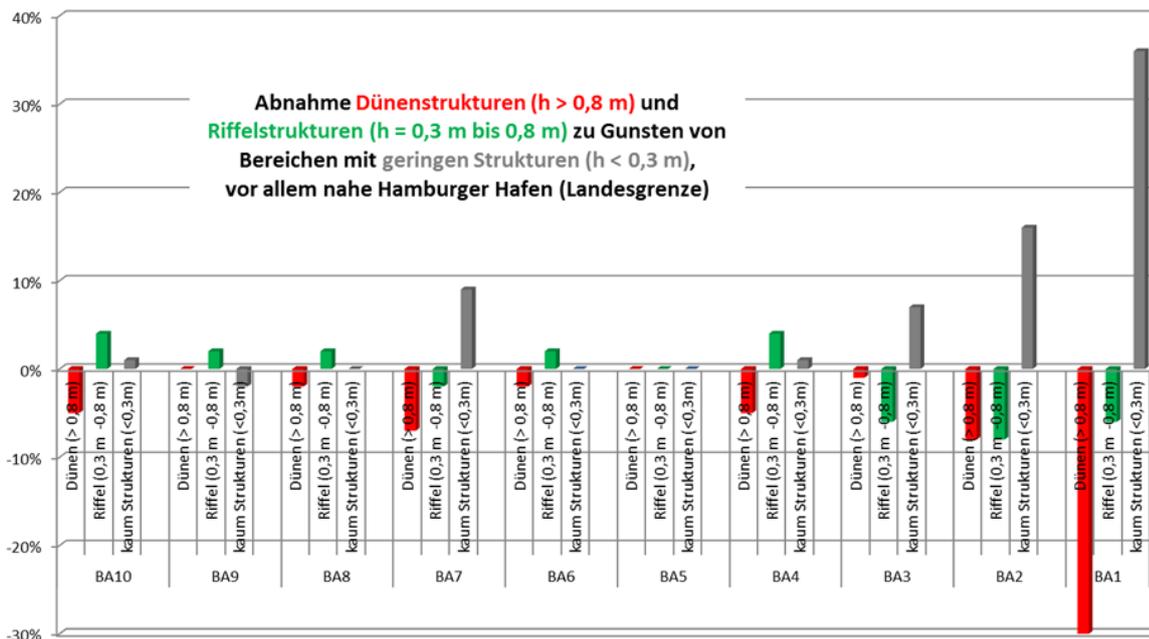


Abbildung 43: Analyse zur Veränderung morphologischer Sohlstrukturen (DGM-W 2016 gegenüber DGM-W 2010). Erkennbar ist eine Abnahme des Flächenanteils mit Dünen- und Riffelstrukturen, dies vorrangig im Streckenbereich nahe des Hamburger Hafens (WSV-Baggerabschnitte 1 bis 3); zur angewandten Methodik vgl. WSA Hamburg (2013).

2.7 Sedimentationsraten

Unterhaltungsbaggerungen sind die Folge von Sedimentablagerungen auf der Gewässer- sohle. Sie werden stets mit einem gewissen zeitlichen Versatz nach der Sedimentation durchgeführt (nach erfolgter Peilung und bei Geräteverfügbarkeit). Bei der Analyse von Jahresdaten spielt dieser Zeitversatz eine eher untergeordnete Rolle, entsprechend kann für Diskussionen auf Jahresstatistiken zu Baggermengen zurückgegriffen werden. Für zeitlich höher aufgelöste Analysen gewässerkundlicher Faktoren, die Einflüsse auf das Sedimentationsgeschehen an der Gewässersohle haben, bedarf es jedoch direkt ermittelter Daten zum Sedimentationsgeschehen.

Mittlere Sedimentationsraten, die mittlere Höhenänderung von Sedimentablagerungen pro Zeiteinheit (z. B. in cm/d), können auf Basis der regelmäßig durchgeführten Peilungen im Bereich der Fahrrinne und der Hafenbecken bestimmt werden. Dazu werden aus jeweils zwei aufeinander folgenden Peildatensätze Differenzmodelle der Gewässersohle gebildet und auf deren morphologische Dynamik (Erosion und Sedimentation) analysiert.

Die Bestimmung der Sedimentationsraten in den Revieren von WSV und HPA, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden, wurden vergleichbare Methoden verwendet, für eine genauere Erläuterung derselben siehe Winterscheid et al. (2019).

2.7.1 Sedimentationsraten in den Sedimentationsschwerpunkten des Hamburger Hafens

Sedimentationsschwerpunkte des Hamburger Hafens sind das Hafenbecken Köhlfleet (Baggerfläche ca. 191.000 m²), der Parkhafen (Baggerfläche ca. 394.000 m²), der Kuhwerder Vorhafen (Baggerfläche ca. 286.000 m²) und die Rethelbe (Baggerfläche ca. 254.000 m²). Dazu kommen die Strombereiche des Köhlbrands (Baggerfläche ca. 518.000 m²), die Süderelbe (Baggerfläche ca. 853.000 m²) sowie die Norderelbe (Baggerfläche ca. 853.000 m²). Für diese Bereiche sind Sedimentationsraten für den Zeitraum von 2013 bis 2018 bestimmt worden. Die Ergebnisse in der Gesamtschau sind in Abbildung 44 zusammen mit dem Monatsmittel des Oberwasserzuflusses am Pegel Neu Darchau dargestellt.

Im direkten Vergleich aller Gebiete untereinander ist zu erkennen, dass die Sedimentationsraten in den beiden Hafenbecken Köhlfleet und Parkhafen am größten sind. Regelmäßig hohe Raten mit über 2 cm/d wurden im Köhlfleet im April 2014 mit 2,59 cm/d, im Mai 2016 mit 2,46 cm/d, im Juni 2017 mit 2,47 cm/d und im Dezember 2018 mit 2,05 cm/d erreicht. Bis auf einzelne Ausnahmen treten in den anderen Hafenbereichen mittlere Sedimentationsraten von < 2 cm/d auf.

Beim Köhlfleet und Parkhafen handelt es sich um die ersten Hafenbecken vor der Stromspaltung, die direkt an der Stromelbe liegen und dazu der Verbringstelle Neßsand am nächsten sind. Sie fungieren daher aufgrund dieser Lage als primäre Sedimentationssenkungen, denn insbesondere im Jahr 2015 und 2016 – bei sehr niedrigen Oberwasserbedingungen und kurze Zeit nach der Umlagerungssaison – sind diese hohen Sedimentationsraten im Köhlfleet zu beobachten.

Oberstrom vom Parkhafen spaltet sich die Unterelbe in einen südlichen und nördlichen Strang auf. Im südlichen Strang befinden sich der Köhlbrand, die Süderelbe und die Rethelbe. Die Sedimentationsraten des Köhlbrands und der Süderelbe zeigen qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Ein möglicher Grund hierfür kann sein, dass sich beide Gebiete mitten in der Stromelbe befinden, wo grundsätzlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten als in den strömungsberuhigten Hafenbecken. So wird in der Rethelbe im Allgemeinen eine höhere Sedimentationsrate ermittelt als im Köhlbrand bzw. in der Süderelbe. Auch im nördlichen Strang kann ein qualitativ ähnlicher Verlauf der Sedimentationsraten in der Norderelbe und im Kuhwerder Vorhafen beobachtet werden.

Um die Darstellung der Vielzahl an Sedimentationsraten, die auch einer großen Dynamik unterliegen, zu vereinfachen, wurden in der Abbildung 45 für die Zeiträume von November bis April (Winterhalbjahr) und von Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) mittlere Sedimentationsraten berechnet. Mit dieser reduzierten Datenmenge können die verschiedenen Hafenbereiche besser miteinander verglichen werden.

Deutlich zu erkennen sind die niedrigen Sedimentationsraten in allen Bereichen im Sommerhalbjahr 2013, in welches das Elbehochwasser aus dem Juni 2013 fällt. Nicht enthalten ist in dieser Abbildung 45 der Zeitraum von Januar bis April 2013.

Der gesamte nachfolgende Zeitraum ab dem Winterhalbjahr 2013/2014 ist geprägt von in der Tendenz stets weiter steigender Sedimentationsraten (Signifikanz des Anstiegs geprüft mit saisonalem Mann-Kendall Test). Dieser steigende Trend hält bis ungefähr Sommerhalbjahr 2016 an. Die höchsten Raten werden in den Jahren 2015 und 2016 erreicht. Ab dann stabilisieren sich die Raten auf hohem Niveau und gehen in einzelnen Bereichen wie der Norderelbe dann wieder leicht zurück.

Die Darstellung in Abbildung 45 bestätigt zudem die Aussage, dass die Sedimentationsraten in den beiden Hafenbecken Köhlfleet und Rethel im Vergleich zu den anderen Hauptbaggergebieten am größten sind.

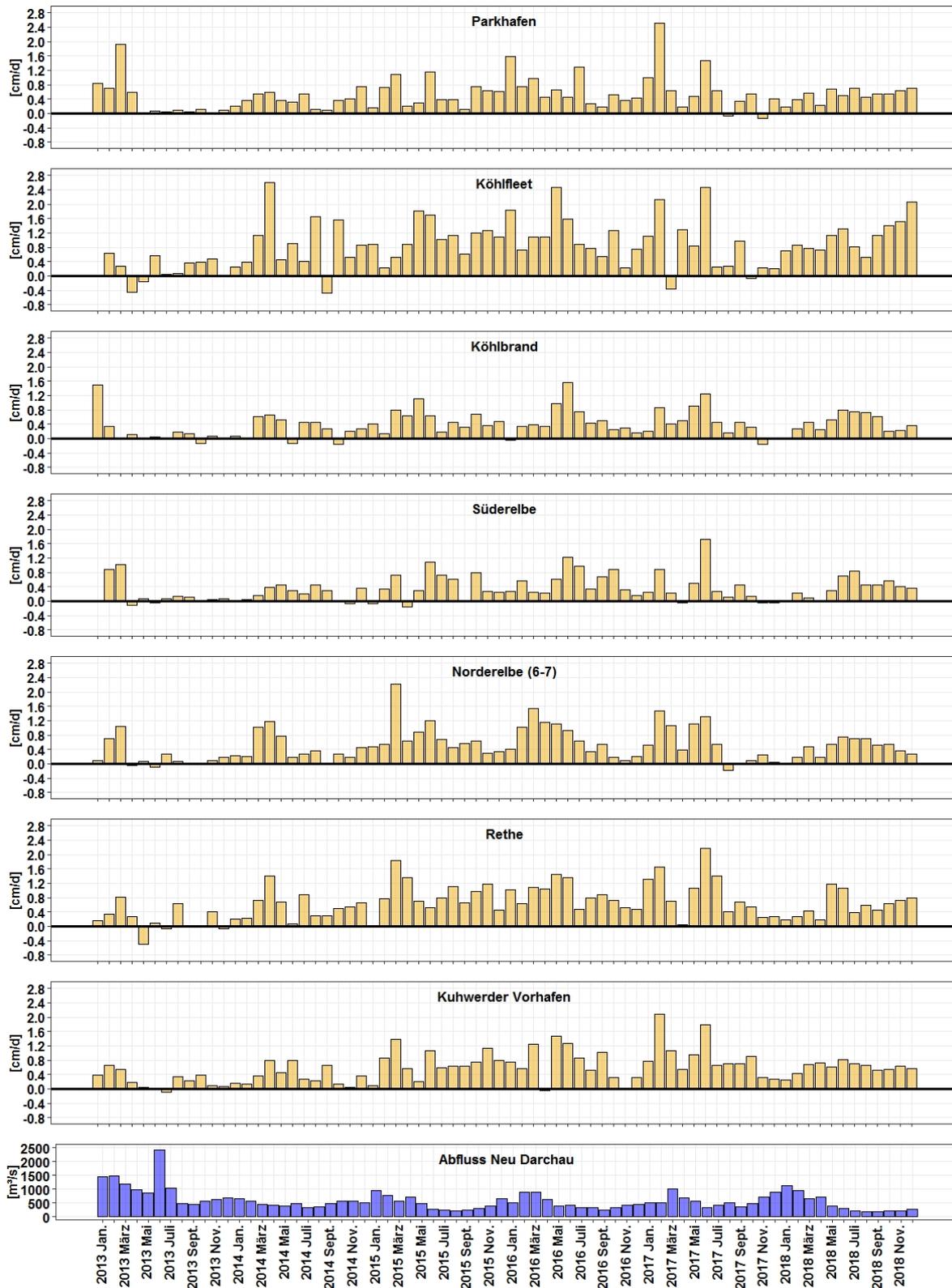


Abbildung 44: Sedimentationsraten in den HPA Sedimentationsschwerpunkte und Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau im Monatsmittel.

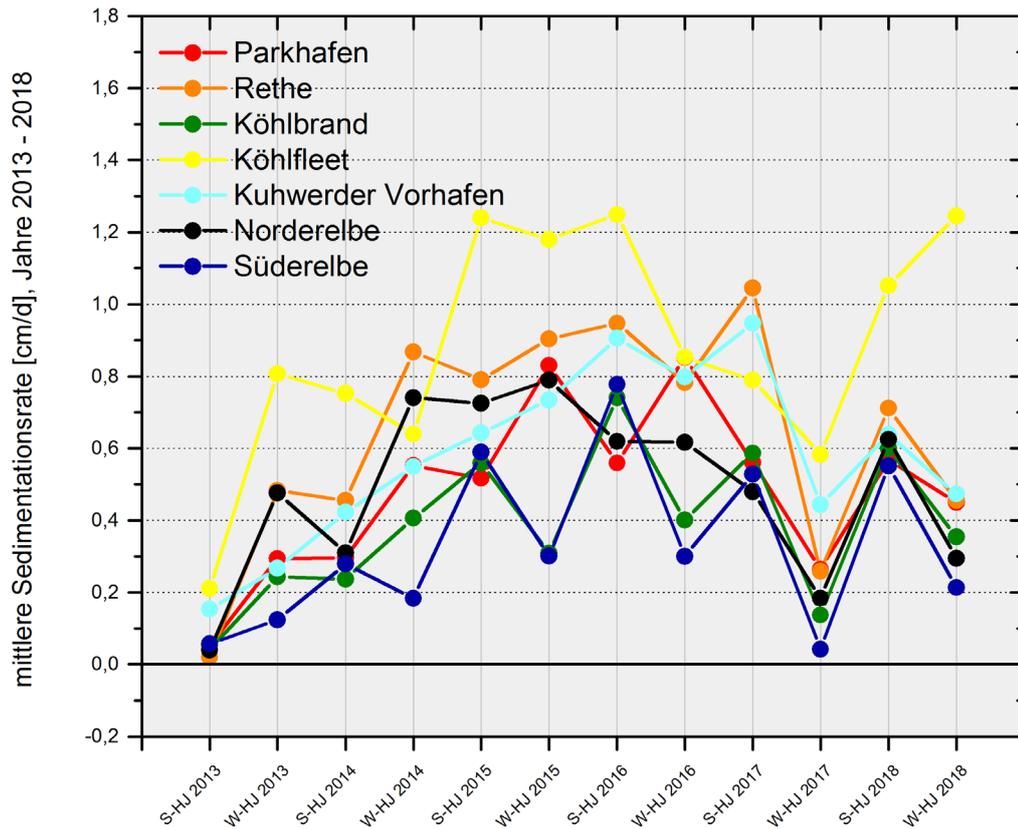


Abbildung 45: Halbjahresmittelwerte der Sedimentationsraten der Sedimentationsschwerpunkte im Hamburger Hafen. Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober; Winterhalbjahr: November bis April. Alle Werte auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 44.

2.7.2 Sedimentationsraten Wedel bis Juellssand und Osteriff

Analog zu Kapitel 2.7.1 gibt Abbildung 46 einen Überblick über das Sedimentationsgeschehen in den WSV-seitigen Baggerschwerpunkten für Feinsedimente: Hierbei handelt es sich um die Fahrinnenabschnitte bei Wedel (Baggerabschnitt BA1, weiter aufgeteilt in die Teilabschnitte Östlich Wedel (Elbe-km 639 bis 641,66) und Sedimentfang Wedel (Elbe-km 641,66 bis 643,9)), Juellssand (BA3, Elbe-km 649,5 bis 654,5) und Osteriff (BA12, Elbe-km 698,5 bis 709,9).

Die höchsten Sedimentationsraten von knapp 2,4 cm/d treten im BA1 (Wedel), hier im Bereich des Sedimentfangs bei Wedel auf, gefolgt von BA12 (Osteriff), danach BA3 (Juellssand). Deutlich zu erkennen ist die Entstehung eines temporären Sedimentationschwerpunktes im BA1, im Bereich östlich von Wedel, erstmals im Winterhalbjahr 2014/2015 und zuletzt im Winterhalbjahr 2016/2017 und damit zeitgleich zur Unterbringung großer Baggergutmengen (maximal rd. 3,5 Mio. t im Winterhalbjahr 2015/2016) nur wenige hunderte Meter stromauf auf Höhe der Insel Neßsand; die Baggerstatistik der früheren Jahre vor 2013 zeigt hier im Bereich östlich von Wedel keine Unterhaltungsbaggerungen. Im April, also nach Beendigung der Umlagerungssaison, klang die Sedimentation stets rasch wieder ab.

Es ist davon auszugehen, dass der nur wenig stromab liegende Bereich Sedimentfang sowie der Baggerabschnitt Juellssand hiervon ebenso betroffen waren, da maximale

Sedimentationsraten systematisch im Zeitraum der Umlagerungssaison oder kurz danach, hier vor allem in den Monaten Februar bis April der Jahre 2016 und 2017, zu beobachten sind.

Zuletzt sind auf die Stelle Neßsand wieder deutlich geringere Baggergutmengen und im Winter 2017/2018 auch wieder bei etwas höheren Oberwasserzuflüssen untergebracht worden, in den Winterhalbjahren 2017/2018 sowie 2018/2019 waren es nur noch rd. 1,5 Mio. t bzw. 0,2 Mio. t (November und Dezember 2018). Zugleich haben die Daten in diesem Abschnitt östlich von Wedel auch keine Sedimentation mehr angezeigt.

In Abbildung 47 sind für die WSV-Baggerabschnitte die mittleren Sedimentationsraten der Zeiträume von November bis April (Winterhalbjahr) und von Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) dargestellt. Im Gegensatz zum Hamburger Bereich haben die Trendanalysen (saisonalen Mann-Kendall Test) für die Baggerabschnitte Osteriff, Juelsand und Sedimentfang Wedel keine signifikanten Anstiege der Raten für den Gesamtzeitraum von Sommerhalbjahr 2013 bis Ende 2017 ergeben.

Auch die Darstellung der Sedimentationsraten als Halbjahresmittelwerte lässt den zuvor beschriebenen Einfluss der Unterbringung von Baggergut bei Neßsand auf die Verhältnisse erkennen. Die beiden Teilabschnitte östl. Wedel und Sedimentfang Wedel, in welche der BA1 aufgeteilt worden ist, erreichen im Winterhalbjahr 2015 ein Sedimentationsmaximum, welches in die Phase einer maximalen Sedimentation im Hamburger Bereich fällt (Abbildung 45). Auffällig im Teilabschnitt Wedel Sedimentfang sind anfangs höhere Sedimentationsraten in den Winterhalbjahren bis 2015, ab dann kehren sich die Verhältnisse und die Sedimentation ist im Sommer stärker als im Winter. Weiter stromab im BA3 (Juelsand) ist ein solcher Effekt bei den Halbjahresmittelwerten nicht zu erkennen.

Im BA12 (Osteriff) treten systematisch höhere Sedimentationsraten im Winterhalbjahr auf, dies ist jedoch aufgrund der Entfernung von über 60 km nicht auf die Unterbringung von Baggergut vor Neßsand zurückzuführen. Ursachen sind vielmehr die Verlagerung der Trübungszone stromab bei den höheren Oberwasserhältnissen im Winterhalbjahr (Abbildung 27) sowie die Remobilisierung und Eintragung von Sedimenten von den seitlich anschließenden Watten infolge von herbstlichen/winterlichen Starkwindereignissen (Winterscheid et al. 2019).

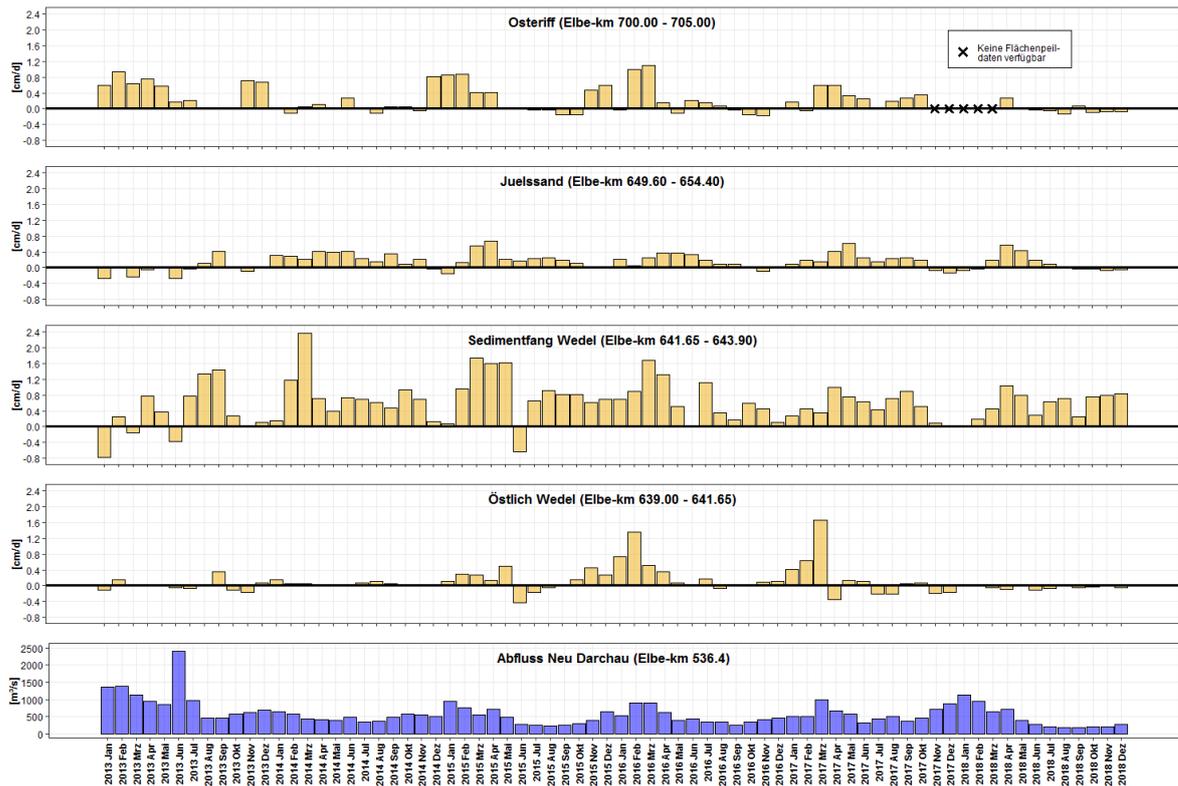


Abbildung 46: Sedimentationsraten in den WSV Baggerabschnitten und Oberwasserzufluss am Pegel Neu Darchau im Monatsmittel, aus BfG (2018).

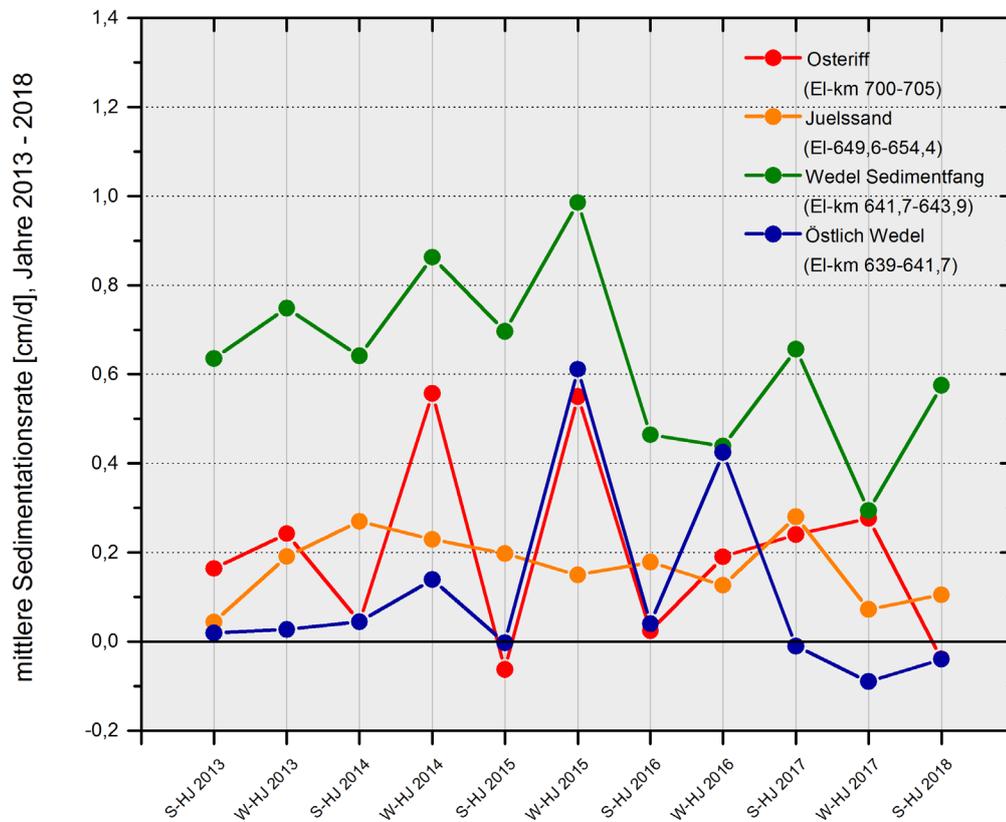


Abbildung 47: Halbjahresmittelwerte der Sedimentationsraten der Sedimentationsschwerpunkte in den WSV Baggerabschnitten Wedel, Juellssand und Osteriff. Sommerhalbjahr: Mai bis Oktober; Winterhalbjahr: November bis April, alle Werte auf Basis der Ergebnisse aus Abbildung 46.

3 Erkenntnisse aus wasserbaulichen Systemstudien der BAW

3.1 Einfluss der morphologischen Veränderungen von 2010 bis 2016

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Topographien im Mündungsbereich für die Jahre 2010 und 2016. Besonders auffällig ist die augenscheinlich stärker ausgeprägte Verbindung zwischen der Medemrinne und dem Klotzenloch, die hydraulisch leistungsfähiger zu sein scheint. Einen ersten Einblick, ob es sich damit wirklich so verhält und welche Auswirkungen die anderen topographischen Veränderungen mit sich bringen, kann nur eine Systemstudie mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell der Tideelbe liefern.

Daher wurde das Tideelbmodell, das für die Topographie und die hydrologischen und meteorologischen Verhältnisse von 2010 kalibriert und validiert ist, genutzt, um die Auswirkungen der topographischen Veränderungen auf die Tidedynamik zu ermitteln. Berechnungsnetz, Randwerte und Modelleinstellungen bleiben dabei unverändert, in der Variante wird lediglich die Topographie aus dem DGM-W 2016 verwendet. In Abbildung 48 ist die resultierende Tiefendifferenz der Modelltopographien zu sehen. Die im Vergleich zur Unterelbe wesentlich stärker ausgeprägte Morphodynamik des Mündungsbereiches ist deutlich zu erkennen.

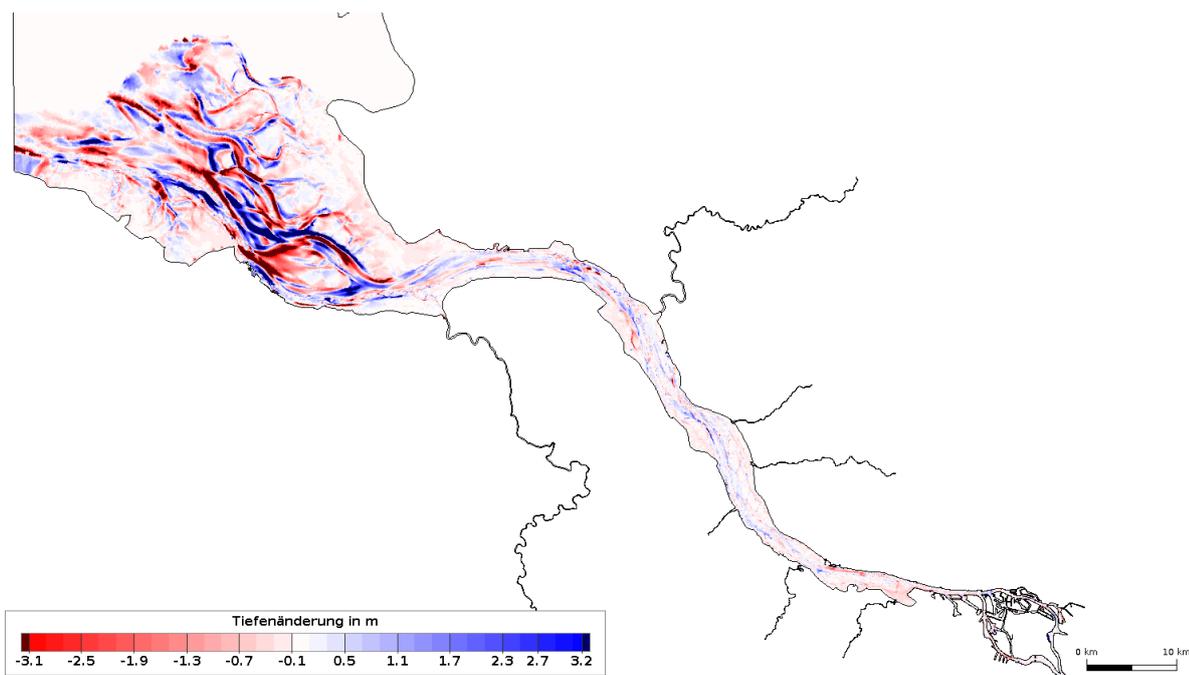


Abbildung 48: Systemstudie – Tiefendifferenz der Modelltopographien für die Jahre 2010 und 2016. Rot: 2016 flacher, blau: 2016 tiefer.

Die veränderten Volumenströme im Mündungsbereich sind anhand der Differenz des mittleren Tidestromvolumens (2016–2010) in Abbildung 49 zu erkennen. Durch die Verlagerung von Sänden und Rinnen ergeben sich lokal größere Verschiebungen, die oberhalb des östlichen Ausgangs der Medemrinne zu einem insgesamt erhöhten Tidestromvolumen führen. Anhand der Differenz des maximalen Tidehubs in Abbildung 50 ist zu erkennen, dass ein Anwachsen des Tidehubs erst oberhalb von St. Margarethen ab Elbe-km 690 stattfindet. Die berechneten Wasserspiegellagen am Pegel St. Pauli für die Modelltopographien 2010 und 2016 sind in Abbildung 51 als Zeitreihe zu sehen. Unten im Bild ist die Differenz

dargestellt. Allein aufgrund der veränderten Topographie steigt in dieser Systemstudie der Tidehub am Pegel St. Pauli um ca. 8 cm.

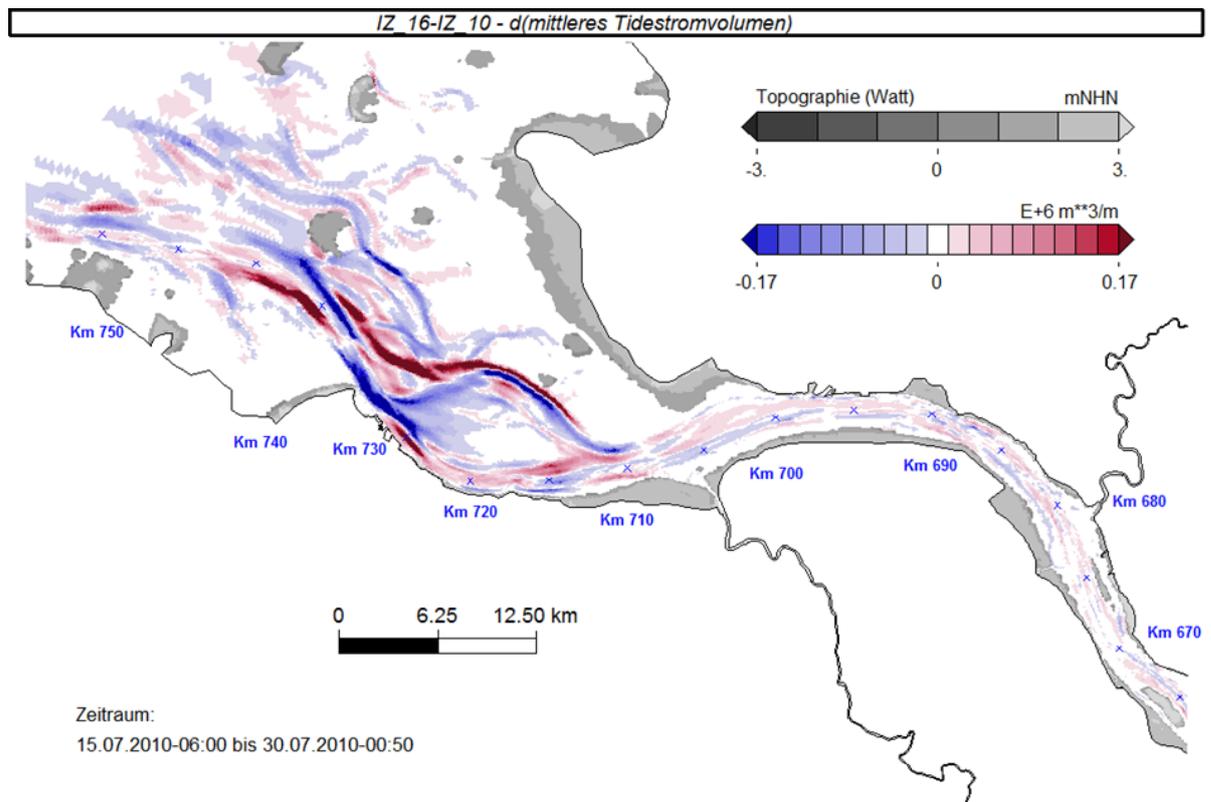


Abbildung 49: Differenz des mittleren Tidestromvolumens (2016–2010).

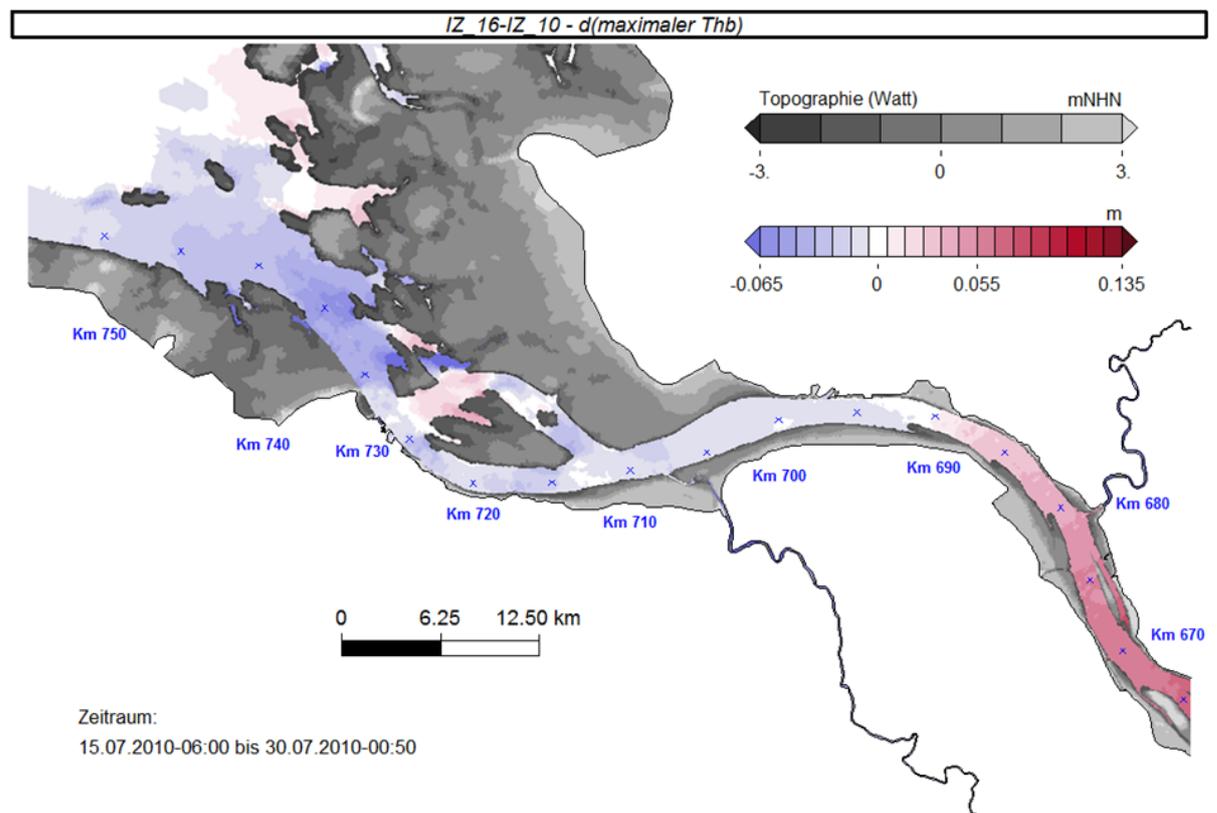


Abbildung 50: Differenz des maximalen Tidehubs (2016–2010).

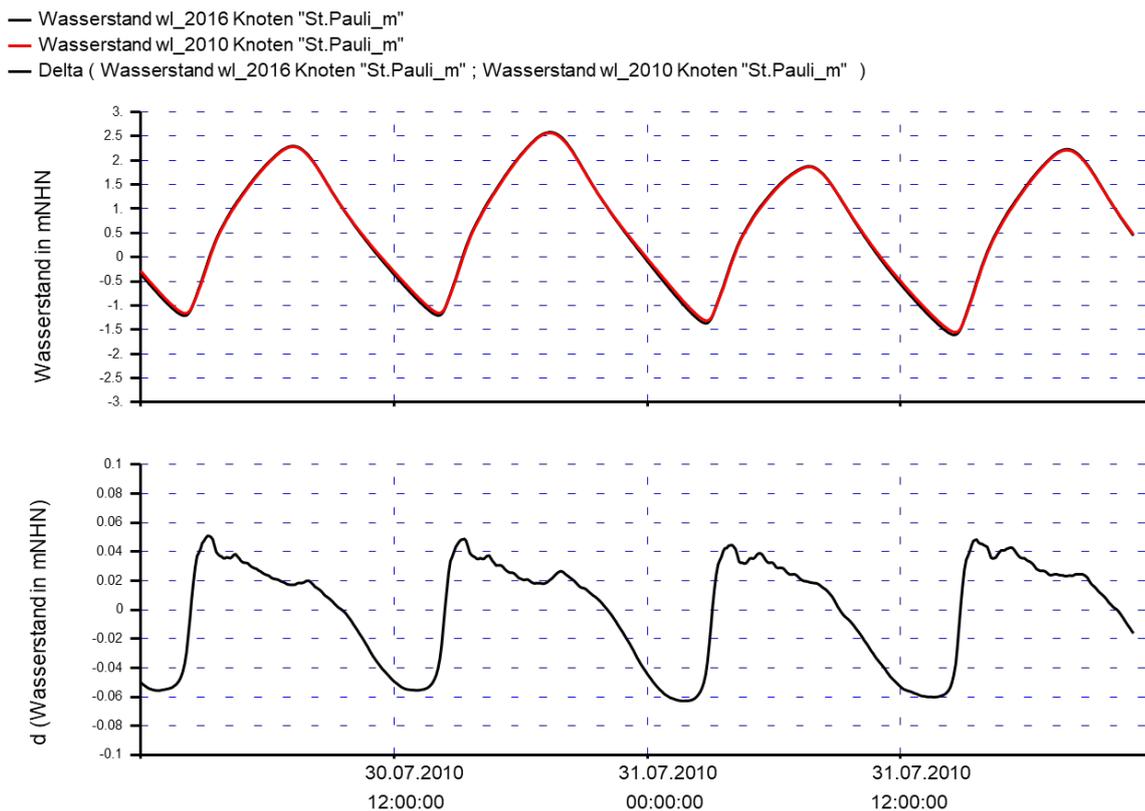


Abbildung 51: Berechnete Wasserspiegellage am Pegel St. Pauli für die Modelltopographien 2010 und 2016. Unten ist die Differenz dargestellt.

3.2 Einfluss einer Unterwasserablagerungsfläche im Bereich Medemrinne-Ost

Die morphologischen Veränderungen im Mündungsgebiet haben erwiesenermaßen einen großen Einfluss auf die Tidedynamik. Daher wurde in einer weiteren Systemstudie in das Modell, das den Zustand 2016 darstellt, im östlichen Bereich der Medemrinne eine Unterwasserablagerungsfläche (UWA) eingebaut, ähnlich wie sie im Rahmen der Fahrrinnenanpassung als Dämpfungsbauwerk aktuell hergestellt wird. Abbildung 52 zeigt einen Ausschnitt aus der Modelltopographie, der modifizierte Bereich ist im Vergleich zu der Abbildung 34 gut zu erkennen. Dieses System und das Referenzmodell wurde dann jeweils über einen Zeitraum von zwei Spring-Nipp-Zyklen simuliert und eine Tidekennwertanalyse durchgeführt.

Als einziges Ergebnis soll hier in Abbildung 53 die Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne dargestellt werden. Durch diese strombauliche Maßnahme würde der mittlere Tidehub großräumig stromauf des Bauwerkes um ca. 7,5–10 cm reduziert werden. Die Veränderung des mittleren Tidehubs ergibt sich im Wesentlichen aus einer Anhebung des MTnw (ca. +6 cm) und nur zu einem geringen Anteil aus einer Absenkung des MThw (ca. –2 cm). Im Mündungsbereich wird der Tidehub direkt stromab der Maßnahme etwas größer werden (ca. +2 cm), zur Mündung hin klingt die Wirkung ab.

Diese Studie kann somit als Beispiel dienen, dass mit einer Strombaumaßnahme im Mündungsbereich die Tidedynamik in der Unterelbe positiv beeinflusst werden kann. Sie bestätigt auch das Strombaukonzept, die Tideenergie im Mündungsbereich zu dämpfen.

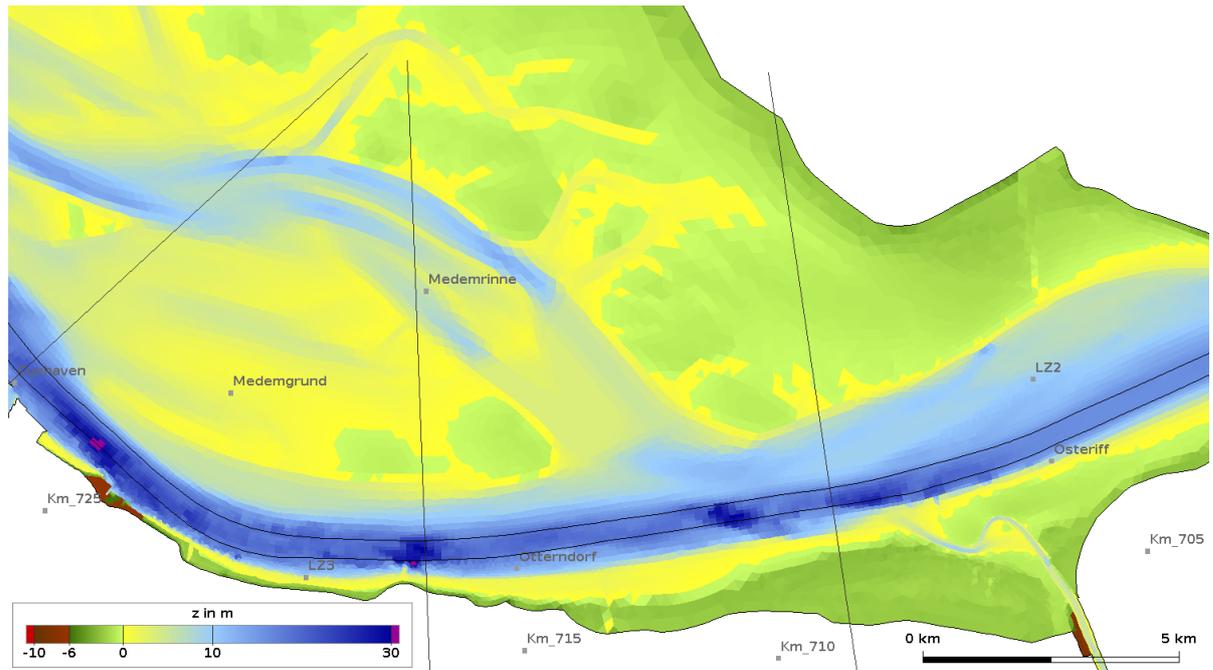


Abbildung 52: Systemstudie – Ausschnitt aus der Modelltopographie 2016, modifiziert mit einer Unterwasserablagerungsfläche (UWA) im östlichen Bereich der Medemrinne.

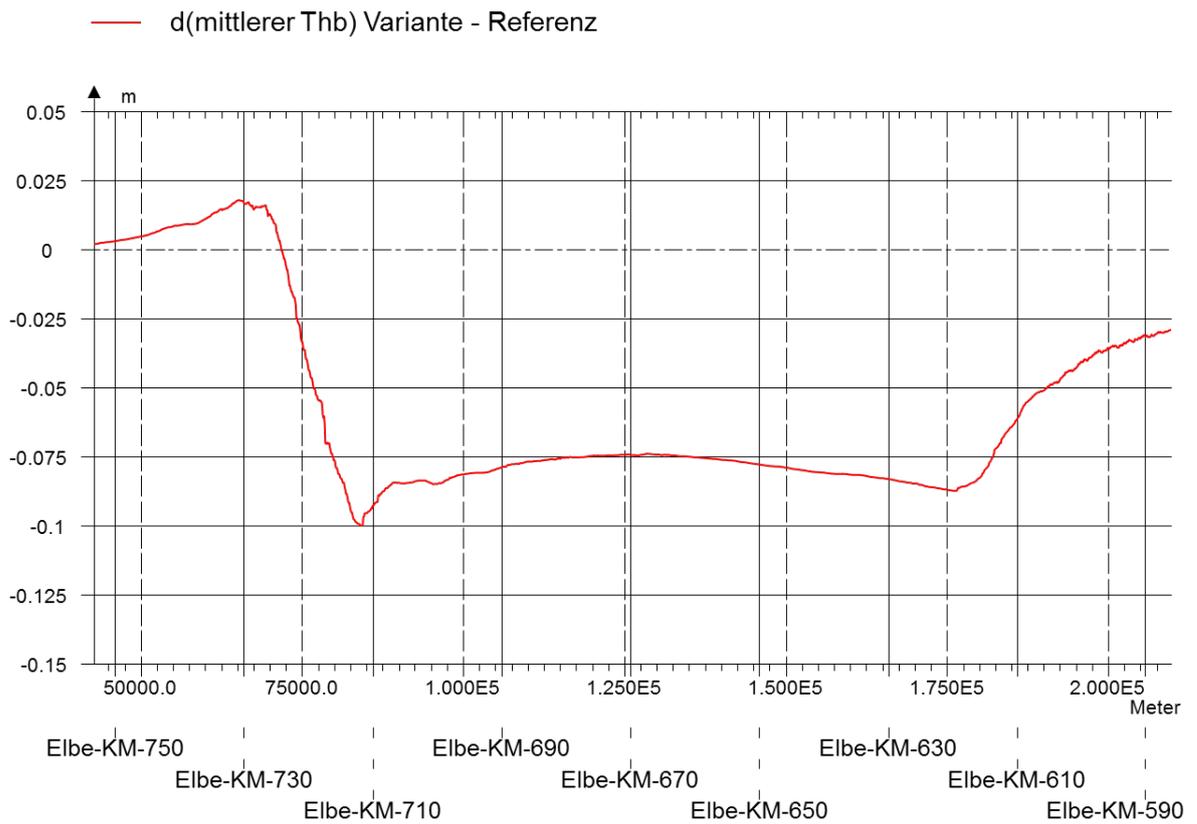


Abbildung 53: Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne.

3.3 Einfluss der effektiven Sohlrauheit zwischen Elbe-km 640 und 655

Mögliche Auswirkungen der in Kapitel 2.6 beschriebenen morphologischen Veränderungen – der Glättung der Sohle im Bereich der Verbringstelle Neßsand – können in Systemstudien abgeschätzt werden, indem der lokale Einfluss der effektiven Sohlrauheit modifiziert wird. Die grundsätzliche Idee des verwendeten Rauheitsmodells ist, dass sich in vorwiegend sandigen Bereichen kleine und große Transportkörper (Riffel, Dünen) ausbilden können, die rauheitswirksam sind (Formrauheit) und somit die Tideenergiedissipation forcieren. Eine Verfeinerung des oberflächennahen Sedimentinventars durch vermehrt anfallende Feinsedimente zerstört diese Sohlformen, somit die Rauheitswirkung der Gewässersohle und verringert dadurch die Tideenergiedissipation.

In einer weiteren Systemstudie wurde daher die effektive Sohlrauheit ca. zwischen Elbe-km 640 und 655 im Bereich der Fahrrinne lediglich auf die Kornrauheit gesetzt, um mögliche Auswirkungen der beobachteten Glättung der Sohle zu studieren. In der Abbildung 54 ist der so modifizierte Bereich in der rechten Abbildung anhand der dargestellten effektiven Sohlrauheit gut zu erkennen. Zusätzlich wurde in diesem Bereich das Sedimentinventar durch ein Schluff-Feinsand-Gemisch ersetzt, um höhere Schwebstoffkonzentrationen und stärkere vertikale Konzentrationsgradienten zu erhalten. Auf diese Weise wird die Energiedissipation durch einen zweiten Wirkpfad – der durch die Dichteschichtung verminderten vertikalen Turbulenz – zusätzlich gedämpft.

Die Auswirkungen dieser Systemstudie sind in der Abbildung 55 als Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne dargestellt. Die lokale Verringerung der Sohlrauheit führt im Bereich der Veränderung und weiter stromauf zu einer Erhöhung des mittleren Tidehubs um bis zu 5 cm. Dieser Wert kommt größtenteils durch ein Absinken des Niedrigwassers zustande. Die Wirkungskette ist kompliziert, die Reflexion der Tidewelle ergibt z. B. weiter stromab eine Dämpfung des Tidehubs um ca. 3 cm, die dort wiederum aus einer Anhebung des Tideniedrigwassers und einer Absenkung des Tidehubs resultiert.

In Abbildung 56 und in Abbildung 57 sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten zu sehen, die im Analysezeitraum für die beiden Modelle detektiert wurden. In dem Modell mit den verringerten Sohlrauheiten (Abbildung 57) sind diese bereichsweise deutlich größer. Die Position der Dauermessstelle D1 ist in den Abbildungen markiert. Auch an dieser Stelle ist die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Variante größer. Für die in Kapitel 2.3 beschriebene Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit könnte somit eine glattere Sohle stromab mit eine Ursache sein.

Vorerst kann anhand dieser Systemstudie festgehalten werden, dass die Tideelbe durchaus sensitiv gegenüber Veränderungen der Sohlrauheit in diesem Bereich ist. Der Einfluss auf den Tidehub ist aber sicherlich deutlich geringer als z. B. der in Kapitel 3.1 untersuchte summarische Einfluss der topografischen Veränderungen. Dies liegt daran, dass mit der Modellkonfiguration dieser Systemstudie die Phänomene (Glättung der Sohle, Erhöhung der Schwebstoffgehalte) stärker als in der Realität beobachtet abgebildet werden und somit die hydrodynamische Auswirkung im Modell größer sind als in der Realität.

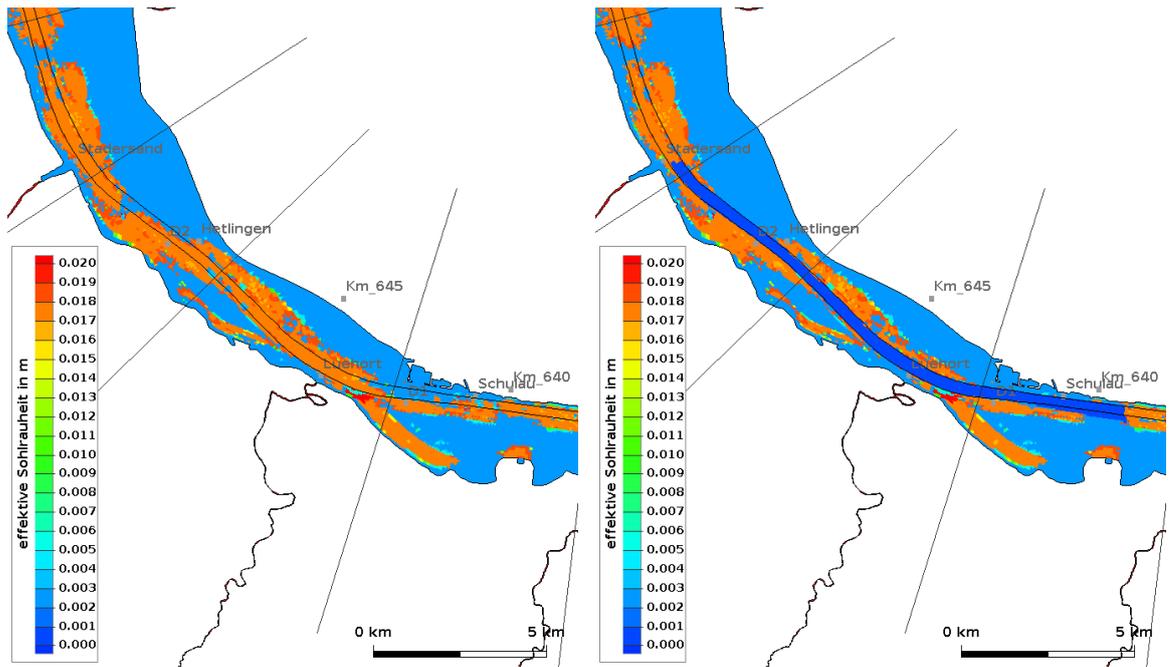


Abbildung 54: Systemstudie – Die Verringerung der effektiven Sohrrauheit in der Fahrrinne zwischen Elbe-km 640 (Wedel) und 655 (Stadersand) ist im rechten Bild zu erkennen.

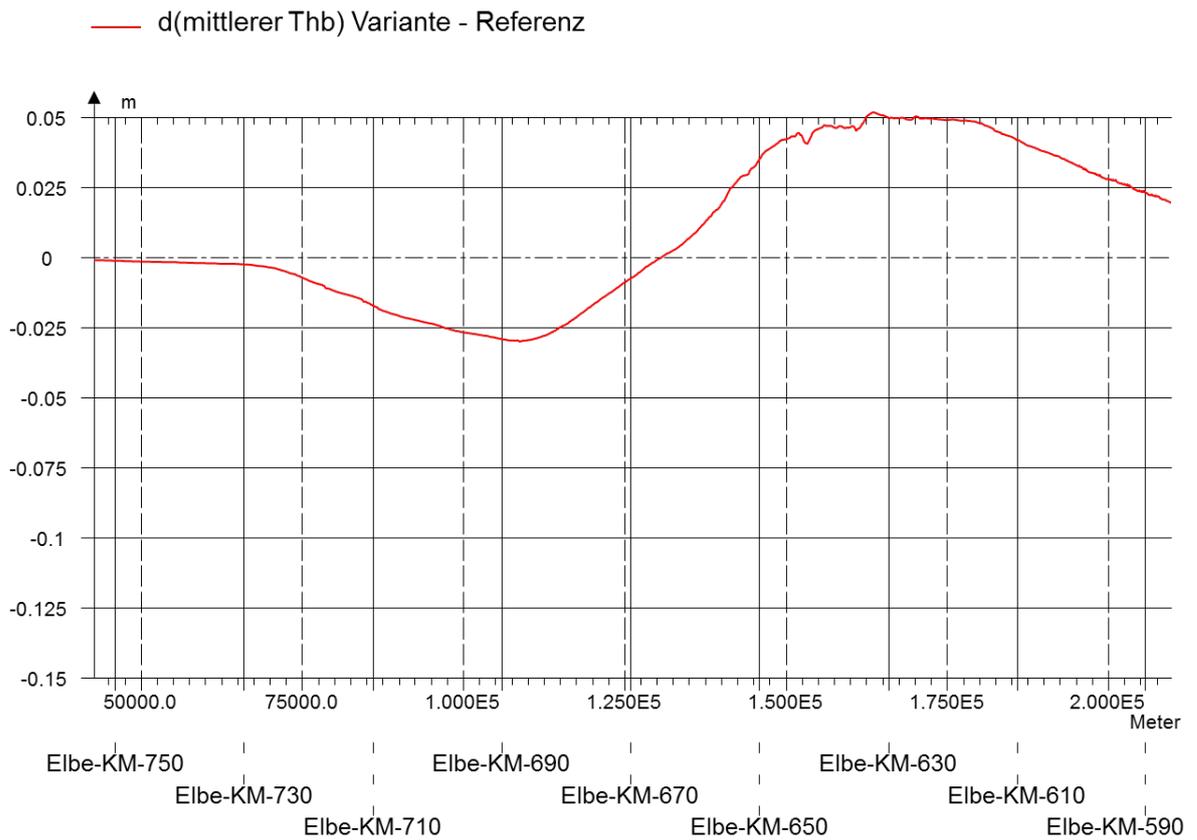


Abbildung 55: Differenz (Variante-Referenz) des mittleren Tidehubs entlang der Fahrrinne.

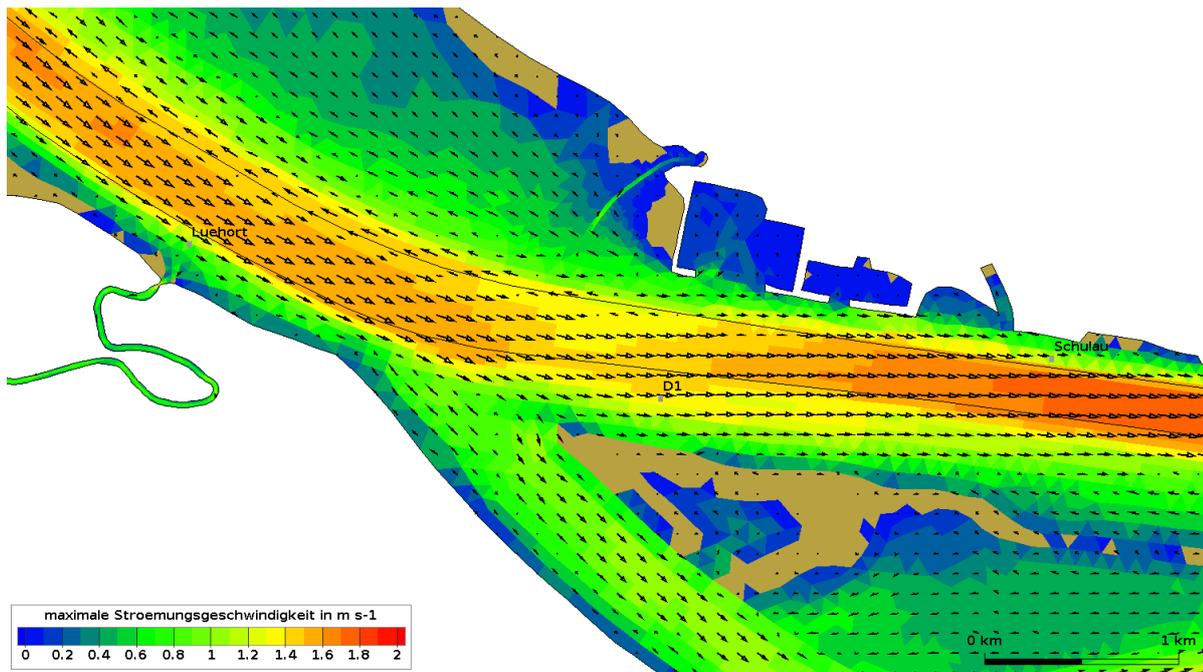


Abbildung 56: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum, System ohne verringerte Sohlrauheiten.

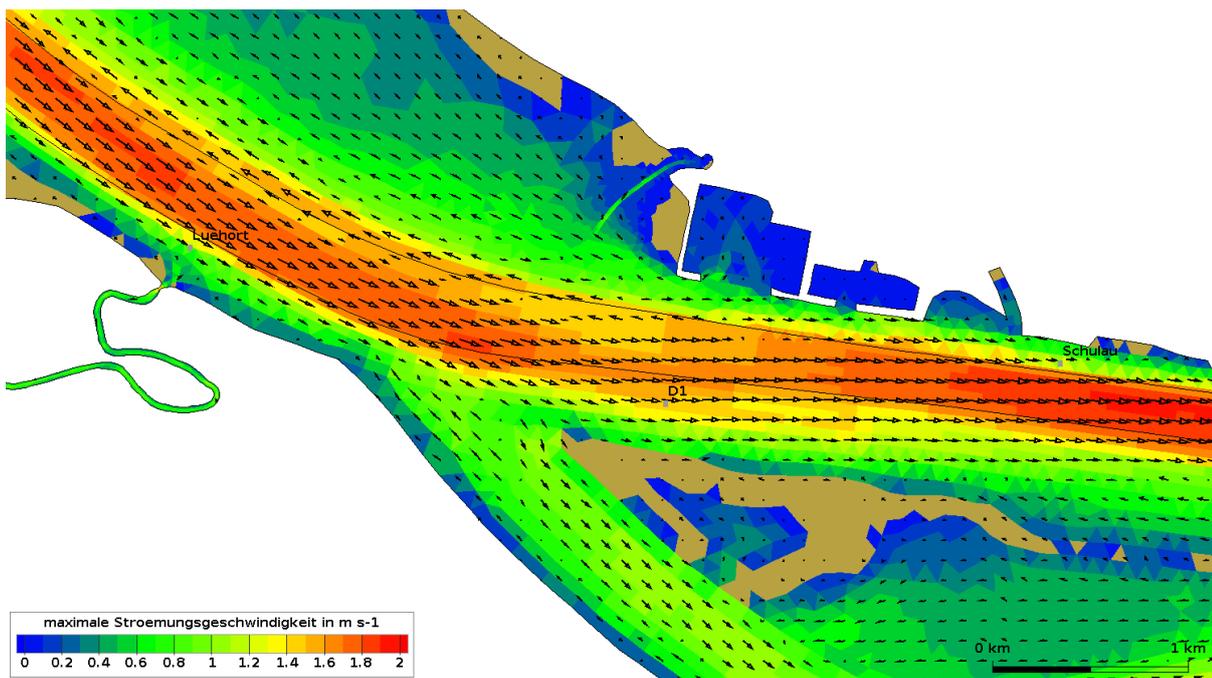


Abbildung 57: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten im Analysezeitraum, System mit verringerten Sohlrauheiten.

4 Erkenntnisse aus dem Datenmodell der HPA

4.1 Aufbau und Kalibrierung des Datenmodells

Das bei der HPA entwickelte Datenmodell zur Berechnung der Sedimentationsmengen im Hamburger Hafen verwendet einen Bilanzierungsansatz, der die komplexen hydrodynamischen Wirkzusammenhänge auf den Sedimenttransport stark vereinfacht und dennoch zu validen Ergebnissen gelangt.

Grundidee des Ansatzes ist die Vorstellung, dass mit jeder Tide in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss jeweils ein prozentualer Anteil des in der Unterelbe befindlichen Sedimentinventars stromab und der Rest stromauf transportiert wird.

Der jeweilige prozentuale Anteil des zurücktransportierten Materials wird durch eine Potenzfunktion (s. Abbildung 58) bestimmt, deren Parameter so zu kalibrieren sind, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den Ganglinien der über mehrere Jahre gemessenen Peilvolumina und den aufsummierten Einträgen in eine „Sammlerzelle Hafen“ (äußere rechte Spalte der Matrix) resultiert.

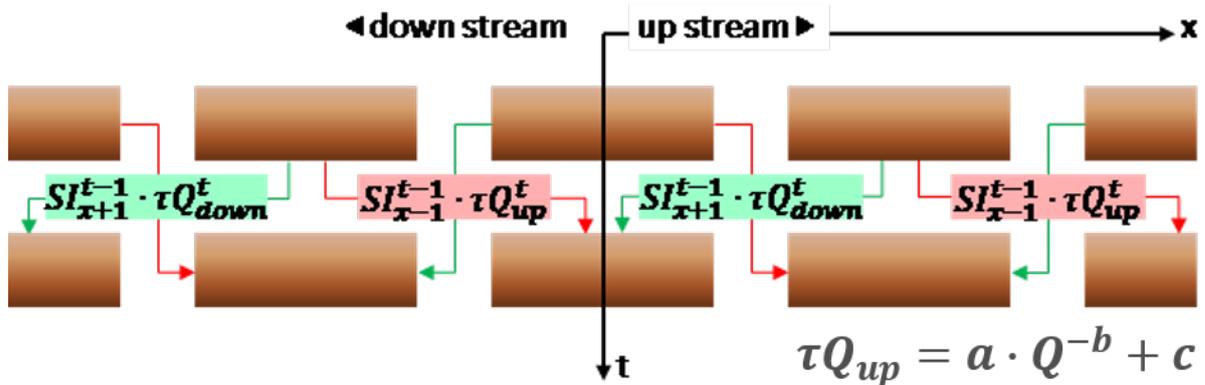


Abbildung 58: Schema zur Aufteilung des Zelleninventars (SI) mittels der Potenzfunktion τQ_{up} .

Mit jedem Zeitschritt (hier: Tide) wird das Inventar einer Zelle aus dem vorangegangenen Zeitschritt auf ihre links (downstream) und rechts (upstream) benachbarten Zellen entsprechend dem Ergebnis der τQ -Funktion vollständig aufgeteilt.

Damit ist das Modell absolut volumentreu, d. h. es gibt keine Akkumulation oder Erosion in einer Spalte und solange keine Massen von außen hinzugefügt oder entnommen werden, bleibt die Summe über eine Zeile konstant, mit der Einschränkung, dass bei hohen Oberwasserzuflüssen auch ein Austrag über die äußere Systemgrenze (zur Linken) erfolgen kann.

Das Sedimentinventar wird genährt durch den Schwebstoffgehalt des Oberwassers, der mit 28 g/m^3 angesetzt wurde. Das entspricht bei einem mittleren Q von $700 \text{ m}^3/\text{s}$ einem Eintrag von 618.000 t/a .

Am äußeren linken Systemrand wird eine variable Zugabe bereitgestellt, wenn das Zelleninventar dort infolge mangelnden Nachschubs von Oberstrom unter eine definierte Schwelle sinkt. Derartige Situationen treten insbesondere in Phasen auf, in denen der Oberwasserabfluss über längere Zeit einen überwiegenden Stromauftransport induziert und dadurch den gepufferten Vorrat im linken Teil der Matrix vollständig verbraucht. Ohne diese Zugabe befände sich bei niedrigen Oberwasserhältnissen nicht genügend Material

im System, um den Anstieg des Sedimentinventars in der „Sammlerzelle Hafen“ realitätsnah abzubilden.

Der maßgebliche Eintrag wird allerdings durch die Umlagerung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen bei Neßsand beigesteuert. Die in der Datenbank für jeden einzelnen Umlauf abgelegten Massen (in Tonnen-Trockensubstanz) werden pro Tide aggregiert in die Zelle (x=0), also 12 Tiden unterhalb der „Sammlerzelle Hafen“ zugegeben. Das Zellinventar in der Sammlerzelle wird um die gleiche Masse reduziert, so dass diese Verbringung für das Gesamtmodell bilanzneutral ist. Zur Tonne E3 verbrachte Baggermengen werden dagegen lediglich aus der Sammlerzelle entnommen. Keine Berücksichtigung finden bislang Sedimentumlagerungen, die durch verschiedene Akteure während einer Wasserinjektionsbaggerung verursacht werden.

Die Veränderungen des Sedimentinventars in der „Sammlerzelle Hafen“ sowie den gewählten 125 Zellen links und 12 Zellen rechts der Umlagerstelle Neßsand lassen sich über die Zeit animiert visualisieren und bieten damit eine anschauliche Demonstration der je nach Abflussmenge stromab oder stromauf wandernden oder um die Einbringstelle akkumulierten Sedimentbudgets (Abbildung 59).

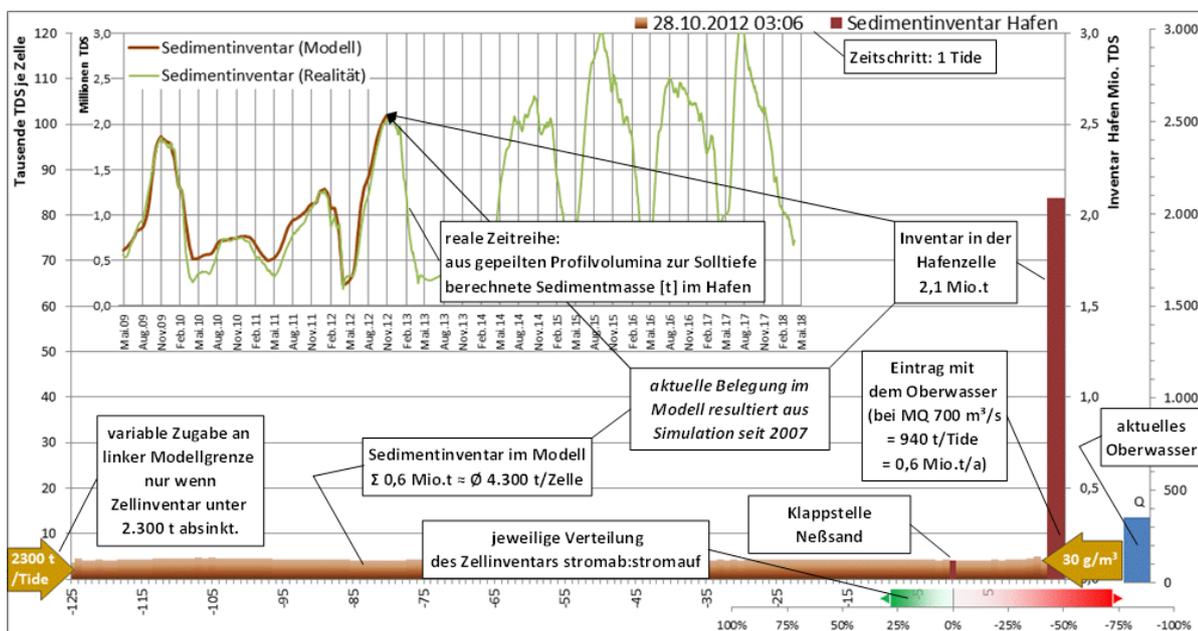


Abbildung 59: Visualisierung des zeitvariablen Zellinventars je Zeitschritt (Tide) in einem Balkendiagramm.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den Ganglinien des modellierten/bilanzierten Zellinventars der „Sammlerzelle Hafen“ und den gepielten Volumina in den sieben Hauptbaggergebieten des Hamburger Hafens. Das Hafeninventar wird aus den Stützstellen der Vor-/Nachpeilungen bei Baggereinsätzen sowie den regelmäßigen Verkehrssicherungspeilungen durch eine kubische Spline-Interpolation in tägliche Werte approximiert.

Die Kalibrierung des Modells setzt mit dem Beginn der Umlagerungssaison im November 2007 auf ein leeres Zellinventar auf. Dieser vereinfachte Ausgangszustand ist nur deshalb gerechtfertigt, weil bereits kurz nach dem Start des Kalibrierungszeitraums der Oberwasserabfluss auf über 1.000 m³/s ansteigt und bis in den Mai 2008 hinein auf einem überdurchschnittlich hohen Niveau von im Mittel rd. 1160 m³/s bleibt. Der sukzessive

Aufbau des Zellinventars kann deshalb durch eine Beschickung der stromab gelegenen Zellen mit dem bei Neßsand eingebrachten Baggergut (2007/08: 1,03 Mio. t) dem Modell selbst überlassen werden.

Insgesamt wurden über den Zeitraum der Modellkalibrierung (11/2007 bis 03/2018) rd. 18 Mio. t Baggergut aus dem Hafen bei Neßsand eingebracht sowie 6,3 Mio. t über das Oberwasser und 3,87 Mio. t durch Zugabe an der äußeren linken Systemgrenze zugegeben. Demgegenüber steht ein Austrag durch Verbringung zur Tonne E3 von 5,5 Mio. t und ein Verlust über die äußere linke Systemgrenze von 2,55 Mio. t. Eine Bilanz sämtlicher Ein- und Austräge ist in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 2: Übersicht und Bilanzierung der in das Modell ein- und ausgetragenen Massen.

Bilanzierung Modelleinträge & -entnahmen		Aufsummierter Eintrag in Hafenzelle	Umlagerungen bei Neßsand	Verbringung zur Tonne E3	WI-Baggerungen (erst ab 2014)	Eintrag übers Oberwasser	Zugabe/ Verlust (Entnahme)* an Modellgrenze	Summen / Bilanzen	
Modelleintrag	[t]		18,06 Mio.			6,30 Mio.	3,87 Mio.	28,24 Mio.	
Modellaustrag	[t]	-23,43 Mio.		-5,52 Mio.	-0,64 Mio.		-2,55 Mio.	-32,23 Mio.	
		↳aufsummiert.....							-3,99 Mio.
Bilanz nur Modell excl. Hafenzelle	[t]	-23,43 Mio.	-5,37 Mio.	nicht relevant für Modell o.HZ	Modelleintrag nicht realisiert	0,93 Mio.	2,25 Mio.		
Bilanz nur Hafenzelle	[t]	23,43 Mio.	5,37 Mio.	-0,15 Mio.	-0,79 Mio.	* Kalibrierung machte Entnahme bei sehr hohem Oberwasser erforderlich			

Die Kalibrierung des Modells zielte in erster Linie darauf ab, die zeitliche Entwicklung der Massen in der „Sammlerzelle Hafen“ in bestmöglicher Übereinstimmung mit der Ganglinie der Peilaußmaße nachzubilden. Wie ein Vergleich der Bilanzen über Ein- und Austräge in Tabelle 2 mit der Bilanzierung des Inventars zu Beginn und Ende des Modelllaufs in Tabelle 3 zeigt, konnte dieses Ziel durch die Kalibrierung erreicht werden.

Tabelle 3: Bilanzierung des Modellinventars am Anfang und Ende des modellierten Zeitraums.

Bilanzierung Modellanfangs-/ -endzustand		Inventar Hafenzelle bei Modellstart	Inventar Hafenzelle am 09.03.2018	Modellinventar excl. Hafenzelle am 09.03.2018	Inventarzuwachs: incl. Hafenzelle
Inventar / Bilanz Modell incl. HZ	[t]	1,56 Mio.	0,78 Mio.	2,31 Mio.	1,53 Mio.
Bilanz nur Hafenzelle	[t]		-0,78 Mio.		

Die Kalibrierungsgröße ist die schon vorgestellte τQ -Funktion, die für eine Oberwassermenge Q die Verteilung des Sedimentinventars auf ihre stromauf- und stromab benachbarten Zellen definiert. Da es keine analytische Lösung für das Problem gibt, bleibt nur der Weg, durch iterative Änderung der drei Funktionsparameter eine zufriedenstellende Annäherung der beiden Ganglinien herbeizuführen. Das Ergebnis belegt die qualitativ hohe Ähnlichkeit von Modell und Messung (Abbildung 60).

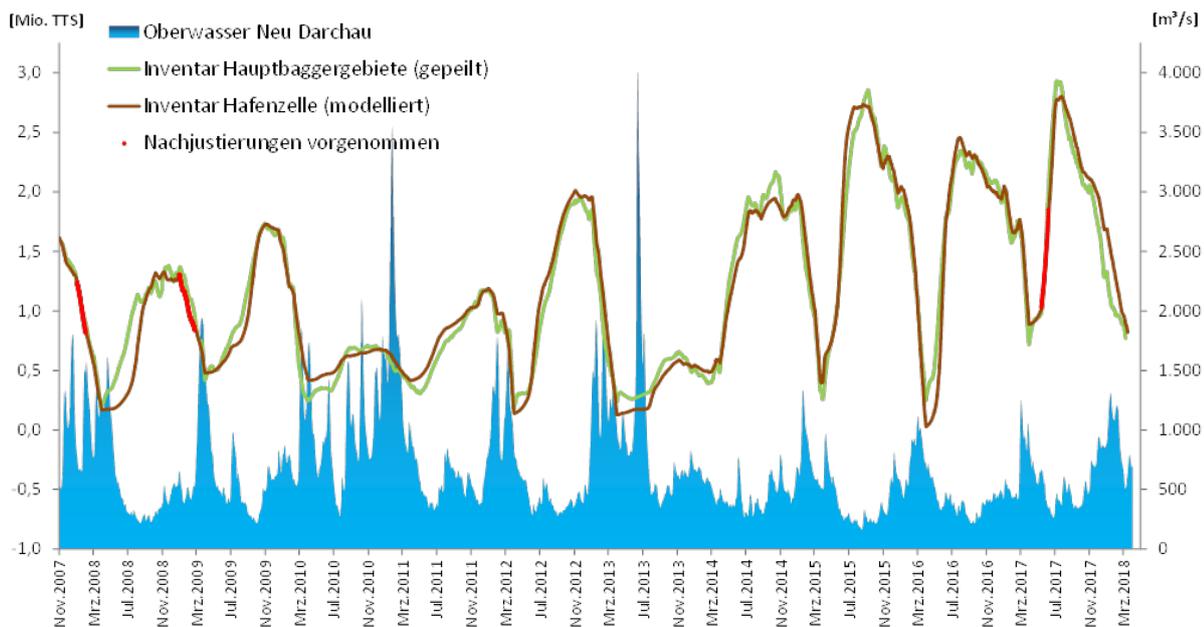


Abbildung 60: Ergebnis der Modellkalibrierung über einen Zeitraum von 11 Jahren.

4.2 Kernaussagen des Datenmodells

Da die Bilanzierung des Ein- und Austrags in die Modellzelle Hafen eine gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung (Peilungen) und Modellierung zeigt, sind folgende Kernaussagen aus dem Modell ableitbar:

- Die Menge des Sedimenteintrags in den Hafen wird dominiert von der Menge der zuvor bzw. gleichzeitig ins System von Ober- und Unterstrom eingetragenen und im System mit Unterhaltungsbaggerungen verbrachten Sedimente (Sedimentverfügbarkeit).
- Der Oberwasserzufluss bestimmt im Wesentlichen die Geschwindigkeit, mit der Baggergutsedimente von der Verbringstelle Neßsand wieder in den Hafen zurücktransportiert werden. Bei langanhaltendem $MQ < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ werden aufgrund der kurzen Entfernung rd. 99 % der auf Neßsand verbrachten Baggergutsedimente wieder zurück in den Hafen transportiert. Ein natürlicher Austrag findet bei diesem Datenmodell erst bei dauerhaft $Q > 700 \text{ m}^3/\text{s}$ statt.
- In den Jahren bis einschl. Frühjahr 2018 war die Bilanz von ein- und ausgetragenen Sedimenten lediglich ausgeglichen, d. h. der Austrag zu Tonne E3 von insgesamt 4,33 Mio. t aus dem Hafen konnte noch nicht die beabsichtigte Wirkung erzielen, die Fracht in dem Sedimentkreislauf Hafen-Neßsand spürbar abzubauen.
- Seit Mai 2018 ist die Bilanz hochgradig negativ. Grund hierfür sind die bei langanhaltendem extrem niedrigem Oberwasserzufluss exponentiell ansteigenden externen Einträge von Unterstrom (Abbildung 62).

Die Massenbilanz der Ein- und Austräge vom 01.04.2014 bis 01.04.2018 ist ein Nullsummenspiel: Eintrag v. Unterstrom (2,45 Mio. t) + Eintrag v. Oberstrom (1,86 Mio. t) – Austrag zu E3 (4,33 Mio. t) = –0,02 Mio. t.

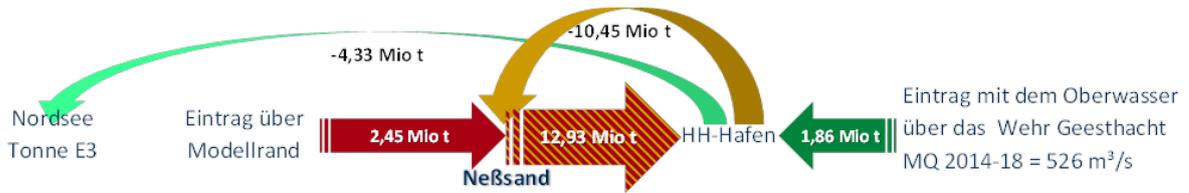


Abbildung 61: Bilanzierung der Ein- und Austräge vom 01.04.2014 bis 01.04.2018.

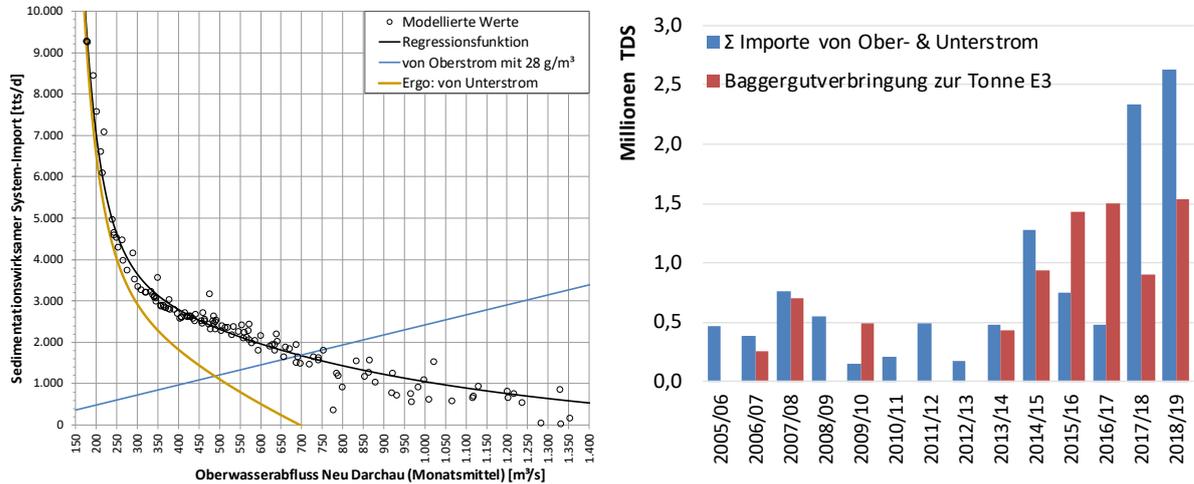


Abbildung 62: Analyisierte Modelldaten; links: Einträge von Unter- und Oberstrom mit Regression zum Abfluss Neu Darchau, rechts: bilanzierte Einträge auf Basis der Regressionsfunktion.

Aufgrund des begrenzten Mengenbudgets, das zur Tonne E3 verbracht werden darf, muss es daher das Ziel sein, den bereits beschrittenen Weg zur Reduzierung der Einträge ins System durch Baggergutumlagerungen bei Neßsand (insbesondere bei geringem Oberwasser) konsequent weiter zu verfolgen. Ergänzend sollten die Mengen und Zeiten von WI-Baggerungen besser koordiniert/reglementiert und den Oberwasserbedingungen angepasst werden.

4.3 Auswirkung alternativer (adaptiver) und strategischer Handlungsoptionen

Die vergleichsweise schnelle Berechnung der Baggermengenentwicklung im Hamburger Hafen bietet erstmals die Möglichkeit, die Auswirkung alternativen Handelns bei gegebenen äußeren hydrologischen Randbedingungen zu ermitteln und auch wirtschaftlich unter Berücksichtigung der ggf. nur in die Zukunft verlagerten Unterhaltungskosten zu bewerten. Hierbei wurde im Rahmen verschiedener HPA-interner Studien bereits untersucht, wie eine Reduktion der Baggermengen zur Umlagerung bei Neßsand in Phasen niedriger Oberwasserzuflüsse in den Wintermonaten die Sedimentationsraten in den nachfolgenden Sommermonaten beeinflussen kann. Als vorläufiges Fazit kann festgehalten werden, dass eine exorbitante Steigerung der Baggermengen gegen Ende der Verbringsaison Februar/März bei ausbleibendem Frühjahrshochwasser (wie z. B. in den Jahren von 2015 bis 2017) nur kurzzeitig oder auch gar nicht (Februar 2017) zu verbesserten Wassertiefen im Hafen führt und bereits nach wenigen Wochen ins Gegenteil umschlägt. Effektiver wäre es, das Baggergut unter Inkaufnahme von Mindertiefen noch vier Wochen länger liegen zu lassen, um es dann in die Nordsee zu Tonne E3 zu verbringen.

Des Weiteren bietet das Modell auch die Möglichkeit, die zu erwartenden Sedimentationsmengen im Hamburger Hafen und ihre zeitliche Entwicklung genauer zu prognostizieren, als dies bisher möglich war. Da die Sedimentationsmengen (zumindest in den letzten Jahren) sehr stark von der Sedimentverfügbarkeit abhängen, können statistische Monatsmittel des Abflusses oder klimatologische Abflussprognosen verwendet werden, um ein Basisszenario der Sedimentationsentwicklung zu simulieren. Darauf aufbauend lässt sich durch worst- und best-case Oberwasserszenarien die zu berücksichtigende Bandbreite für die Mengenkalkulation angeben. Für die Sommersaison 2018 wurde diese Methode erstmals angewendet und resultierte zum Prognosezeitpunkt Anfang April in einer Sedimentationsmenge von 2,25 Mio. t TS $\pm 10\%$ bis zum Ende Oktober (Abbildung 63).

Mit fortschreitender Dauer und Einbeziehung des tatsächlichen Oberwasserzuflusses wird die Bandbreite zusehends enger, so dass die Mengendisposition ggf. nachgesteuert werden kann.

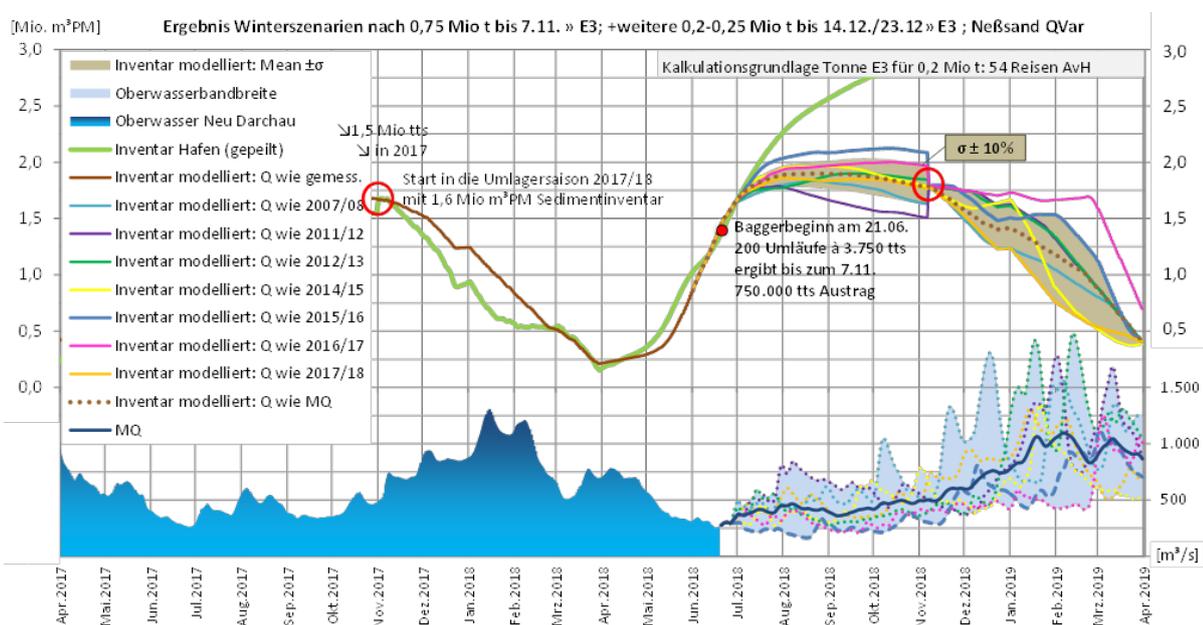


Abbildung 63: Szenarien zur Entwicklung des Sedimentinventars im Hamburger Hafen für unterschiedliche Abflussbedingungen und eines geplanten Austrags von 1 Mio. TTS in die Nordsee.

5 Zusammenfassung der beobachteten Veränderungen und Systemstudien

Vor einer Erklärung bzw. Ursachenanalyse werden nachfolgend zunächst die in Kapitel 2 beschriebenen Veränderungen im Bereich Hydrologie und Morphologie sowie die Erkenntnisse aus den Systemstudien der BAW (Kapitel 3) und dem Datenmodell der HPA (Kapitel 4) kurz zusammengefasst:

Hydrologie

- **Oberwasserzufluss** (Kapitel 2.1): Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ im Juni 2013 bewegt sich der Oberwasserzufluss der Elbe auf einem in Relation zum langjährigen statistischen Mittel sehr niedrigen Niveau (nachfolgend bezeichnet als Niedrigwasserphase 2013f). Die geringen Zuflüsse der vergangenen Jahre traten sowohl in den Sommer- wie auch in den Wintermonaten auf.

- **Tidehub** (Kapitel 2.2): Seit Jahrzehnten gibt es einen Anstieg des Tidehubs im oberen Abschnitt der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Wehr Geesthacht. Dieser Anstieg hat sich jedoch zwischen 2010/2011 und 2017 beschleunigt; am Pegel St. Pauli um den Faktor 4 auf rund 3 cm/a. Weiter stromab im Amtsbereich Hamburg wurde die gleiche Entwicklung – jedoch in abgeschwächter Form – beobachtet. Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder. Im Amtsbereich Cuxhaven und am Pegel Helgoland können keine signifikanten Änderungen festgestellt werden.
- **Strömungsgeschwindigkeiten** (Kapitel 2.3): Seit Beginn der Niedrigwasserphase 2013f lagen die mittleren maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bis 2017 sowohl für den Ebbe- als auch für den Flutstrom an der Station Teufelsbrück (Elbe-km 631,0) und an den Dauermessstationen D1 (Elbe-km 643; Wedel) bis D4 (Elbe-km 676,5; Rhinplate) auf einem höheren Niveau als in den davorliegenden Jahren; etwas geringer fällt der Anstieg für die mittleren Geschwindigkeiten aus. Eine besondere Situation zeigt sich bei D1, da hier die mittleren Geschwindigkeiten bei Flutstrom angestiegen und bei Ebbestrom gesunken sind. Ab dem Jahr 2018 ist an allen Stationen ein Rückgang der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Dazu zeigen sich seit Beginn der Niedrigwasserphase 2013f im Strombereich nahe Hamburg bzw. im Hamburger Hafen Erhöhungen der mittleren Flutstromdauern und Verringerungen der mittleren Ebbestromdauern.

Morphologie und Baggermengen

- **Trübungsverhältnisse/Schwebstoffgehalte** (Kapitel 2.4): Seit dem höchsten gemessenen Abfluss HQ im Juni 2013 und der daran anschließenden Niedrigwasserphase 2013f konnte im oberen Abschnitt der Tideelbe zwischen Brokdorf und dem Hamburger Hafen ein Anstieg der Trübung bzw. der dazu korrespondierenden Schwebstoffgehalte und ein Verharren derselben auf einem deutlich gesteigerten Niveau festgestellt werden. An den Dauermessstationen D4 bis D1 sowie Seemannshöft erfolgte dieser Anstieg sprunghaft im Zeitraum Oktober 2013 bis Februar 2014. Dieser sprunghaften Veränderung gingen zwei Sturmflutereignisse voraus, welche zu Beginn des Zeitraums anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse auftraten. Die bislang vorliegenden Ergebnisse belegen einen Wirkzusammenhang zwischen der Remobilisierung einer großen Menge an Feinsedimenten auf den Wattflächen und Vorländern (infolge Sturmflut), dem anschließenden Stromauftransport (infolge anhaltend niedrigem Oberwasserzufluss) und dem beobachteten sprunghaften Anstieg und Verharren der Schwebstoffgehalte auf einem deutlich gesteigerten Niveau. Eine vergleichbare Entwicklung kann auch für den Zeitraum anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse ab Sommer 1989 nachvollzogen werden, nachdem es hier im Februar 1990 zu einer äußerst ungewöhnlichen Folge von Sturmflutereignissen gekommen ist.
- **Baggermengen und Sedimentationsraten, hier Hamburger Hafen** (Kapitel 2.5.1 und 2.7.1): Infolge der Niedrigwasserphase 2013f hat es einen Anstieg der Baggermengen zur Umlagerung bei Neßsand gegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein noch stärkerer Anstieg der Baggermengen sowie eine weitere Intensivierung der Kreislaufbaggerung zwischen Hamburg und Neßsand durch die Wiederaufnahme der Verbringung von Baggergut zur Tonne E3 in der Nordsee bei Helgoland verhindert wurde. Korrespondierend zum anhaltend niedrigen

Oberwasser zeigen die Sedimentationsraten in den Baggerschwerpunkten des Hamburger Hafens eine ansteigende Tendenz. Eine Stabilisierung auf hohem Niveau bzw. ein leichter Rückgang (Entlastung durch E3-Verbringung) zeigt sich für das Jahr 2017. Trotz einer weiteren Reduzierung der Umlagerungsmenge bei Neßsand wurden 2018 wieder höhere Sedimentationsraten in den Hamburger Baggerschwerpunkten beobachtet. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die niedrigen Oberwasserbedingungen weiter anhalten und eine hohe Verfügbarkeit von Sedimenten vorhanden ist.

- **Baggermengen und Sedimentationsraten, hier Baggerabschnitte Wedel bis Juellssand** (Kapitel 2.5.2 und 2.7.2): In die Niedrigwasserphase 2013f fallen ebenfalls die Jahre mit den größten Sedimentmengen, die in den Baggerabschnitten Wedel (BA1) bis Juellssand (BA3) zu Unterhaltungszwecken gebaggert werden mussten. In den Jahren von 2013 bis 2015 sind die Baggermengen in den BA1 bis 3 deutlich angestiegen und verharren seitdem auf diesem konstant hohen Niveau. Die Auswertungen der Sedimentationsraten bestätigen diese Entwicklung.
- **Baggermengen in Nebenbereichen, hier Durchstich zur Wischhafener Süderelbe** (Kapitel 2.5.4): In den Jahren nach 2013 ist es zu deutlichen Auflandungen im Bereich des Wischhafener Fahrwassers gekommen. Seit 2014/2015 ist dieses bei Niedrigwasser in weiten Teilen trockengefallen. Mit abnehmender Durchströmung des Fahrwassers hat der Unterhaltungsaufwand im Durchstich (Fährverbindung Glückstadt – Wischhafen) zugenommen. Vergleichbare Entwicklungen, die zugleich auch einen mindestens temporären Verlust an Sedimentations- und Flutraum bedeuten, hat es auch in anderen Nebenbereichen gegeben. Eine Bewertung dazu, wieviel Sedimentationsraum in der Phase mit hohen Schwebstoffgehalten verloren gegangen ist, ist aktuell noch nicht möglich; hier sind weitere Untersuchungen und Datenauswertungen in den kommenden Jahren notwendig.
- **Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter und im Fahrwasserbereich** (Kapitel 2.6.1): Zwischen 2010 und 2016 ist es zu ausgeprägten morphologischen Veränderungen im Mündungsbereich gekommen, die auf einen verstärkten Energieeintrag in die Tideelbe schließen lassen. Auch wurden erosive Tendenzen im Fahrwasserbereich stromauf von St. Margarethen beobachtet.
- **Morphologische Veränderungen Transportkörperstrecke zwischen Elbe-km 633 (Höhe Tinsdal-Blankenese) und Elbe-km 641,8 (Höhe Wedel)** (Kapitel 2.6.2 und 2.6.3): Diese rd. 9 km lange Transportkörperstrecke mit einer mittel- bis grobsandigen Gewässersohle erstreckt sich über die Zuständigkeitsbereiche des WSA Hamburg und der HPA. Für den östlichen Teil wurde eine fortschreitende Glättung morphologischer Strukturen ab dem Jahr 2015 beobachtet. Dünen- und Riffelstrukturen, die in 2010 noch klar erkennbar waren, konnten in 2017 nicht mehr eindeutig detektiert werden, insbesondere im Bereich der Umlagerstelle Neßsand. Jüngste Auswertungen (2018 und 2019) zeigen im Hamburger Bereich eine mögliche Rückkehr der Dünen- und Riffelstrukturen, obgleich die geometrischen Kennzahlen der Transportkörper sich in den letzten Jahren verändert haben (weniger Transportkörper mit einer gleichzeitigen Verlängerung der mittleren Transportkörperlänge). Eine noch stärkere Änderung der morphologischen Eigenschaften der Gewässersohle konnte für den westlichen Abschnitt stromab der Umlagerstelle Neßsand beobachtet werden. Hier ist es ab 2015 zu einer vollständigen Überdeckung der ursprünglichen

Transportkörperstrukturen und mittel- bis grobsandigen Gewässersohle mit Feinsedimenten gekommen. Eine Glättung der Transportkörperstrukturen zeigt sich in geringerem Maße auch in den angrenzenden Baggerabschnitten Lühesand und Juelssand.

Erkenntnisse aus Modelluntersuchungen:

- **Die wasserbaulichen Systemstudien der BAW** (Kapitel 3) zeigen, dass allein aufgrund der veränderten Topographie (Vergleich 2010 zu 2016) im Mündungsbereich der Tidehub am Pegel St. Pauli um ca. 8 cm ansteigt. Weitere Systemstudien zum Einfluss der Sohlrauheit zwischen Wedel und Stadersand belegen, dass die Tideelbe durchaus sensitiv gegenüber Veränderungen der Sohlrauheit in diesem Bereich ist. Der Einfluss auf den Tidehub ist jedoch deutlich geringer als z. B. der summarische Einfluss der topografischen Veränderungen. Eine Modellbetrachtung zu Strombaumaßnahmen im Mündungsgebiet verdeutlicht, dass diese in Bezug auf die aktuell veränderte Topographie besonders gut geeignet sind, einer Erhöhung des Tidehubs entgegenzuwirken. Ein Bauwerk ähnlicher Natur der im Rahmen der Fahrrinnenanpassung derzeit gebauten UWA Medemrinne würde den mittleren Tidehub stromauf des Bauwerks um 7,5 bis 10 cm reduzieren.
- **Das Datenmodell der HPA** (Kapitel 4) zeigt eine hohe Abhängigkeit des Sedimentationsgeschehens im Hamburger Hafen vom Oberwasserzufluss und von den Mengen Baggergut, die im Winterhalbjahr bei Neßsand umgelagert werden. Der Oberwasserzufluss bestimmt im Wesentlichen den Anteil und die Geschwindigkeit des Rücktransports der Baggergutsedimente in den Hafen. Ein Austrag aus dem kurzen Baggerkreislauf findet bei diesem Datenmodell erst bei länger andauernden Oberwasserzuflüssen von $Q > 700 \text{ m}^3/\text{s}$ statt. Das Modell kann auch belegen, dass aufgrund des in 2014 wieder aufgenommenen Feinmaterialaustrags zur Tonne E3 zumindest bis zum April 2018 ein weiterer Anstieg der Baggermengen im Hamburger Hafen vermieden werden konnte. Für die seit Mai 2018 anhaltenden und durchgehend extrem unterdurchschnittlichen Abflussverhältnisse mit $MQ=340 \text{ m}^3/\text{s}$ und bis dato 180 Tagen oder $\approx 31 \%$ unter dem langzeitstatistischen 0,5 %-Quantil von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ reicht der genehmigte Austrag jedoch bei weitem nicht aus, um dem unter diesen Bedingungen um ein Vielfaches höheren Nachschub aus der Trübungszone wirksam zu begegnen.

6 Erklärung der beobachteten Veränderungen

Die beobachteten Veränderungen im Bereich der Hydrologie und Morphologie können unter Berücksichtigung der Modelluntersuchungen nach derzeitigem Kenntnisstand auf die folgenden drei Ursachenbereiche zurückgeführt werden:

- Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter
- Niedrigwasserphase 2013f
- Unzureichend angepasstes Sedimentmanagement

Morphologische Veränderungen im Mündungstrichter

Die wasserbaulichen Systemstudien der BAW zeigen, dass die Veränderung der Morphologie im Bereich des Mündungstrichters eine wesentliche Ursache der Veränderungen im

Wasserstands- und Strömungsgeschehen stromauf von St. Margarethen ist. Neben den evidenten Veränderungen im Mündungstrichter ist langjährig betrachtet im WSV-Amtsbe- reich Hamburg eine vorwiegend erosive Tendenz im Fahrrinnenbereich sowie in den an- grenzenden Fahrwasserrändern (Bereich zwischen Tonnenstrich und 8m-Linie) zu verzeichnen.

Die mit dem Modell ermittelten Differenzen des mittleren Tidehubs spiegeln sich auch in den Tidekennwerten der Tideelbepegel wieder. Nach den bisher vorliegenden Analysen ist, u. a. ausgelöst durch den Durchbruch des Klotzenloches in 2008/2009, ab etwa 2009/2010 von einer Aufweitung im Bereich des Mündungstrichters und damit von einem verstärkten Energieeintrag in das Elbästuar auszugehen. Nach zwei weiteren schweren Sturmfluten 2013/2014 und dem Beginn der Niedrigwasserphase 2013f wird der Tidehub durch die abnehmende Energiedissipation aus Bodenreibung im Fahrrinnenbereich nahe Hamburg in geringerem Maß zusätzlich erhöht.

Die Konstruktion eines Zusammenhangs mit der Fahrrinnenanpassung von 1999 ist nach 12 Jahren ohne Änderung des vorherigen Trends (siehe Abbildung 4) kaum herzu- stellen und scheidet als mögliche Ursache aus. Auch gab es seit 2003 nach der Herstellung von ca. 140 ha EADS-Standort Erweiterungsflächen im Mühlenberger Loch weder nen- nenswerte andere anthropogene Eingriffe in das System, noch Belege für natürliche mor- phologische Veränderungen im oberen Elbeästuar, die für die Tidehub-Entwicklung ur- sächlich herangezogen werden könnten.

Niedrigwasserphase 2013f

Wenngleich die Größe des Oberwasserzuflusses einen gewissen Einfluss auf die Dämpfung des Tidehubs hat, kann doch ein ausschließlicher direkter Zusammenhang zwischen der Niedrigwasserphase 2013f und dem beschleunigten Anstieg des Tidehubs in dieser Grö- ßenordnung negiert werden. Empirische Untersuchungen zum Einfluss des Oberwasser- zuflusses auf die Tidewasserstände im Hamburger Hafen (Fickert und Strotmann 2009) ergaben eine Größenordnung von weniger als einen halben Zentimeter Tidehubdämpfung am Pegel St. Pauli je 100 m³/s Veränderung beim Oberwasserzufluss.

Die Auswirkungen eines dauerhaft niedrigen Oberwasserzuflusses auf den Feinsedi- menthaushalt sind jedoch dramatisch: Es erfolgt kein natürlicher Austrag von Feinmaterial in Richtung Nordsee und Sedimente werden im Bereich der Unterelbe verstärkt stromauf verfrachtet. Durch den Vergleich mit der Niedrigwasserphase 1989/1993 (Abbildung 24) kann belegt werden, dass es grundsätzlich in solchen Phasen mit niedrigen Oberwasserzu- flüssen zu einer deutlichen Erhöhung des Schwebstoffinventars und einem starken Anstieg der Schwebstoffgehalte kommt. Entsprechend steigen auch die Baggermengen insbeson- dere in strömungsberuhigten Hafenbereichen stark an.

Während dieser Phasen ist von verstärkten Auflandungen in Nebenbereichen auszuge- hen. Auf jeden Fall gehen während länger anhaltender Niedrigwasserphasen temporär Flut- räume verloren.

Unzureichend angepasstes Sedimentmanagement

Bei niedrigen Oberwasserzuflüssen kommt es aufgrund der Kreislaufbaggerungen im Be- reich des Hamburger Hafens zu einer zusätzlichen Anreicherung des lokalen Schwebstoff- haushaltes und der sohnahen Sedimenttransporte. Symptomatisch und besonders augen- fällig sichtbar sind die Veränderungen in der Transportkörperstrecke zwischen den Elbe- km 633,0 und 641,8 (vgl. Abschnitte 2.6.2 und 2.6.3). Während der Zeiträume 2015/2016

und 2016/2017, in denen hohe Mengen feinkörnigen Baggerguts bei Neßsand verbracht wurden, ist es hier zu einer Überdeckung ehemals vorhandener Dünen- und Riffelstrukturen gekommen. Weiter zeigt die Datenauswertung über die Niedrigwasserphase 2013f, dass die Sedimentationsraten in den Baggerabschnitten Wedel (BA1) und Julessand (BA3) im Mittel im Zeitraum von März bis Mai (Abbildung 46) deutlich erhöht sind und viele Sedimentationsschwerpunkte im Hamburger Hafen im Februar und März vorübergehend erhöhte bzw. maximale Sedimentationsraten aufweisen (Abbildung 44).

Parallel zur Anreicherung des lokalen Schwebstoffhaushaltes wurden während der Verbringzeiträume in den BA1 und BA3 sowie im Hamburger Hafen Sedimentationsräume hergestellt, u. a. da im Zeitraum von Mitte April bis Ende Juni keine Baggararbeiten durchgeführt werden, um Schädigungen der Roten-Liste-Art Finte (Laichzeit) auszuschließen. Auch erfolgt im Zeitraum Februar/März zu Winterende bevorzugt eine Räumung weiterer, direkt unterhalb des Hafens gelegener Sedimentationsräume (u. a. Este-Fahrwasser, Hafenbereiche Wedel). Es ist davon auszugehen, dass diese Unterhaltungsaktivitäten mit zu den erhöhten Sedimentationsraten beigetragen haben. Zeitliche Verschiebungen bzw. Anpassungen sind hier aufgrund naturschutzfachlicher und/oder genehmigungsrechtlicher Vorgaben kaum möglich.

Die Überdeckung von Dünen- und Riffelstrukturen und eine damit einhergehende Verringerung der Form- und Kornrauheiten der Gewässersohle sind für den Fahrinnenbereich zwischen Elbe-km 633,0 und 654,5 aus Messdaten belegt. Der mögliche Einfluss auf das Tidegeschehen lässt sich anhand der Modellbetrachtungen der BAW abschätzen. Demnach ist der Einfluss auf den Tidehub vorhanden, aber sicherlich deutlich geringer als z. B. der in Kapitel 3.1 untersuchte summarische Einfluss der topografischen Veränderungen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass eine frühzeitigere und/oder zeitweise höhere Entlastung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar erforderlich gewesen wäre. Das Datenmodell der HPA lässt darauf schließen, dass eine Stabilisierung in Phasen mit langjährigen niedrigen Oberwasserzuflüssen durch einen jährlichen Austrag um die 1 Mio. t/a ($\sim 2,5$ Mio. m^3/a) aus dem System erreicht werden kann. Zum Vergleich: In der BfG-Systemstudie II wurde abschätzend ein kontinuierlich notwendiger, noch zu überprüfender mittlerer Austrag von 1 Mio. m^3/a genannt (BfG 2014). Allerdings liegt dieser Schätzung nur die Erfahrung früherer Jahre mit noch deutlich höheren Oberwasserzuflüssen zu Grunde.

Notwendig wäre ein flexibleres Handeln im Feinsedimentmanagement gewesen. Darüber hinaus ist für den Mündungstrichter zu prüfen, ob das Sedimentmanagement hier adaptiver gestaltet werden kann.

Fazit:

Für die beschriebenen Veränderungen im Tideelbesystem sind nach derzeitigen Erkenntnissen morphologische Veränderungen – insbesondere im Mündungstrichter – ursächlich, die durch die Folgen der seit Sommer 2013 anhaltenden Phase unterdurchschnittlich niedriger Oberwasserzuflüsse überlagert und durch ein auf diese Entwicklung unzureichend angepasstes Sedimentmanagement verstärkt werden.

Entsprechend sind für die Zukunft notwendige Strategieänderungen beim Sedimentmanagement zu diskutieren. Maßnahmen, die unmittelbar umgesetzt werden können, sind zu identifizieren und zu realisieren. Auch Strombaumaßnahmen im Mündungstrichter müssen denkbar sein, morphologische Veränderungen hier schneller erkannt und soweit möglich bereits im Rahmen der laufenden Unterhaltung berücksichtigt werden.

Wie sich die Verhältnisse in der Tideelbe im aktuellen Systemzustand nach Ende der Niedrigwasserphase 2013f entwickeln werden und wie diese durch ein angepasstes Sedimentmanagement positiv beeinflusst werden könnten, ist in den kommenden Jahren zu erarbeiten. Insbesondere ist hierbei von Interesse, wann sich die erhöhten Schwebstoffgehalte wieder reduzieren und welche morphologischen Entwicklungen sich ergeben. Wichtige zukünftige Aufgabenschwerpunkte für ein Sedimentmanagement liegen sicherlich im Bereich des Mündungstrichters.

7 Handlungsempfehlungen

Mit Fokus auf die Morphologie sollen zum Abschluss die nachfolgenden Handlungsempfehlungen als Reaktion auf die skizzierten Entwicklungen an der Tideelbe zur Diskussion gestellt werden. Grundsätzlich ist das Sedimentmanagement im Hinblick auf folgende vier Zielsetzungen weiter zu optimieren:

- Gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters als Beitrag zur Drosselung der einschwingenden Tideenergie
- Erhalt von Dünen- und Riffelstrukturen im Fahrrinnenbereich und Vermeidung von Sandverlusten im inneren Ästuar
- Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar
- Weitgehende Entlastung von nicht vermeidbaren Baggerkreisläufen

Gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters

Das im Mündungstrichter anfallende sandige Unterhaltungsbaggergut wird derzeit bevorzugt im Bereich des Neuen Lüchtergrundes sowie im Bereich Medemgrund/Medemrinne verbracht. Das Entladen geschieht bislang ausschließlich durch Öffnen der im Schiffsboden eingelassenen Ventile (Klappen). Zusätzlich hierzu sollte die Nutzung des Rainbow-Verfahrens, die Einrichtung von Spülleitungen sowie die Baggerung von kurzen „Zufahrtswegen“ geprüft werden. Ziel dieser alternativen Methoden wäre es, das sandige Baggergut weiter hinein in flachere Gewässerbereiche zu verbringen und so mittels gezielterer Sedimentzufuhr maßgeblich zu einer Drosselung bzw. Dämpfung der einschwingenden Tideenergie beizutragen.

Eine gezielte Sedimentzufuhr in den Bereich des Mündungstrichters ist auch aus dem inneren Ästuar (Feinmaterial mit Sandanteilen) und aus dem Bereich der Nordsee (Sand) möglich. Die Verbringung von Feinmaterial aus dem inneren Ästuar ist dabei aufgrund der vorhandenen Schadstoffbelastung nur in begrenzter Menge möglich und bedarf weiterer ökologischer Betrachtungen.

Größere Strombaumaßnahmen im Bereich der Elbmündung zur Drosselung der einschwingenden Tideenergie, die über die laufende Unterhaltung hinausgehen, sind im Strombau- und Sedimentmanagementkonzept Tideelbe (WSD Nord und HPA 2008) zwar benannt, werden in diesem jedoch nicht konkretisiert. Im mit Stakeholdern seitens HPA und WSV im Zeitraum von 2013 bis 2015 geführten Dialogforum Tideelbe (www.dialogforum-tideelbe.de) wurde die Konzeption von Strombaumaßnahmen im Mündungstrichter, u. a. im Hinblick auf naturschutzfachliche Unterhaltungsziele und die Genehmigungsfähigkeit sehr kritisch diskutiert.

Grundsätzlich muss zum Strombau im Mündungstrichter wohl festgehalten werden, dass entsprechende Planungen hier nur über Jahre bis Jahrzehnte konzipiert und umgesetzt

werden können. Gerade deswegen ist es nötig, zum jetzigen Zeitpunkt weiter über Konzeptionen für den Mündungstrichter zu diskutieren. Dies auch vor dem Hintergrund, dass mittel- bis langfristig im Rahmen des Klimawandels zusätzliche Sedimentimporte aus der vorgelagerten Nordsee erforderlich werden dürften (vgl. u. a. „Strategie für das Wattenmeer 2100“ des MELUR Schleswig-Holstein), um ein Mitwachsen der Watten beim zu erwartenden Meeresspiegelanstieg zu gewährleisten.

Für die Jahre 2006, 2010 und 2016 liegen hochaufgelöste digitale Geländemodelle (Bathymetrie und Topographie) der Tideelbe vor. Zur Datenaufnahme wurden dabei neben Peilungen umfangreiche Laserscanbefliegungen von Wattbereichen beauftragt. Die aus den Datenaufnahmen entwickelten digitalen Geländemodelle sind eine wichtige Grundlage für die Beobachtung morphologischer Veränderungen und die wasserbauliche Systemanalyse. Zur weiteren Beobachtung der Entwicklung im Mündungstrichter, der durch eine sehr intensive morphodynamische Aktivität geprägt ist, sind die Datenaufnahmen zwingend fortzuführen und wo räumlich notwendig, zeitlich zu verdichten. Auswertungen z. B. von Luftbildern in engerer zeitlicher Auflösung oder Nutzung von Satellitendaten zur Beobachtung von Rinnenverlagerungen und Veränderungen bei den Wasser-Land-Grenzen können die Datengrundlage ergänzen. Parallel dazu müssen bestehende Modellierungswerkzeuge bei der BAW so weiterentwickelt werden, dass mit Hilfe stets aktualisierter morphodynamischer Simulationen Auswirkungen von Veränderungen im Mündungstrichter erkannt und ggf. möglichst zeitnah begegnet werden kann. Dies ist mittels Strombaumaßnahmen sowie einer damit einhergehenden Anpassung des Sedimentmanagementkonzepts für den Mündungstrichter möglich.

Erhalt von Dünen- und Riffelstrukturen sowie Vermeidung von Sandverlusten im inneren Ästuar

In den Fahrrinnenabschnitten stromauf des Osteriffs bis in den Hamburger Hafen hinein bewegen sich in der Fahrrinne mittelsandige Sedimente mit sehr viel geringeren residualen Transportraten als das vor allem in der Wassersäule bevorzugt stromauf transportierte Feinmaterial. Dabei tragen sandige Dünen- und Riffelstrukturen zu einer Energiedissipation und damit zu einer Verminderung der einschwingenden Tideenergie bei. Daher sind bei der Fahrrinnenunterhaltung im inneren Ästuar, wie aktuell bereits praktiziert, der Transport und die Verbringung von sandigem Baggergut auf weit stromab gelegenen Stellen oder sogar die Entnahme von Sedimenten zu vermeiden, indem zur Beseitigung lokaler sandiger Einzeluntiefen bevorzugt das Verfahren der Wasserinjektionsbaggerung eingesetzt wird. Alternativ ist eine Baggerung mit einem Hopperbagger und eine ortsnahe Verbringung der gebaggerten Sedimente vorzunehmen, wie dieses seit 2017 durch die Einrichtung und Nutzung von acht kleineren Verbringstellen zwischen Wedel und Brokdorf umgesetzt wird (vgl. BfG 2015).

Die Hamburg Port Authority hat u. a. im April 2016 sandiges Baggergut von der Verbringstelle Neßsand in die benachbarte Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese eingebracht, um dem defizitären Sandhaushalt in diesen Fahrrinnenabschnitten der Unterelbe entgegenzuwirken. Umfassende Auswertungen (HPA 2016) zeigen, dass durch Baggerungen an der Verbringstelle Neßsand und die ortsnahe Verbringung des sandigen Baggerguts auf die gewählten Teilflächen in der Transportkörperstrecke Tinsdal-Blankenese keine relevanten Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind. Dies konnte auch durch das an die Verbringung von Baggergut anschließende Monitoring im Frühjahr 2016 nachgewiesen werden. Es wird daher empfohlen, auch zukünftig sandiges Baggergut von der

Verbringstelle Neßsand in diese Transportkörperstrecke einzubringen und mit einem Monitoring zu überwachen.

Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar

Im Rahmen des seitens HPA und WSV im Zeitraum von 2013 bis 2015 mit Stakeholdern geführten Dialogforums Tideelbe konnte als Konsens festgehalten werden, dass auch aus ökologischer Sicht eine Stabilisierung des Feinsedimenthaushaltes im inneren Ästuar erfolgen soll. Aus Sicht der Unterhaltenden ist hierfür eine weiträumige Verbringung stromab auf Stellen in ebbstromdominanten Abschnitten der Tideelbe erforderlich.

Um insbesondere in Phasen eines niedrigen Oberwasserzuflusses, wie in der aktuellen Niedrigwasserphase 2013f, flexibel reagieren zu können, ist anzustreben, hierfür bereits bestehende Handlungsoptionen zu erhalten sowie zusätzliche, bereits angedachte Handlungsoptionen zu nutzen (BfG 2014). Zur weiteren Absicherung der Wirkung der verschiedenen Optionen und Gesamtoptimierung des Feinsedimentmanagements sind verschiedene Unterhaltungsszenarien zu betrachten. Hierbei sind insbesondere die bestehenden Modellierungswerkzeuge der BAW zu nutzen und weiter zu entwickeln.

Aus ökologischer und naturschutzfachlicher Sicht ist vor allem der Schadstoffaspekt zu beachten und bildet daher einen Schwerpunkt bei allen bisher durch die BfG erstellten Auswirkungsprognosen für die Unterbringung von Baggergut. Grundsätzlich sollte die Sanierung von Schadstoffquellen im Elbeinzugsgebiet mit hoher Priorität verfolgt werden, da zukünftig jede Verbesserung der Sedimentqualität eine Erweiterung von Handlungsspielräumen beim Sedimentmanagement bedeutet.

Weitgehende Entlastung von nicht vermeidbaren Baggerkreisläufen

Eine zusätzliche Anreicherung des lokalen Schwebstoffhaushaltes, sowie eine damit verbundene zusätzlich verringerte Energiedissipation an der Gewässersohle wie auch ein stärkerer Anstieg der Baggermengen können zum einen vermieden werden, indem bei niedrigem Oberwasserzufluss Baggergut weiter stromab umgelagert wird und zum anderen, indem mit besserem Systemverständnis nicht vermeidbare Kreislaufbaggerungen optimiert durchgeführt werden.

Mit dem Datenmodell der HPA (Kapitel 4) konnte ein besseres Verständnis des Baggerkreislaufes zwischen Neßsand und dem Hamburger Hafen erreicht werden. Beispielsweise können jetzt fundierte Angaben über die durchschnittliche Dauer des Rücktransports für verschiedenen Abflussverhältnissen gemacht werden. So dauert es bei einem Abfluss von $400 \text{ m}^3/\text{s}$ etwa 7 Wochen bis nahezu das gesamte bei Neßsand umgelagerte Baggergut wieder in den Hafen zurück transportiert wird. Das umgelagerte Baggergut fände damit innerhalb einer Umlagersaison vom 7. November bis 31. März nahezu 3-mal den Weg zurück in den Hafen und müsste also insgesamt 4-mal gebaggert werden. Wenngleich solche Verhältnisse über die gesamte Dauer der Umlagersaison bisher noch nicht vorgekommen sind, verdeutlicht das Beispiel doch die empfindliche Abhängigkeit der Unterhaltungsaufwendung im Hamburger Hafen vom Oberwasserzufluss. Aktuell werden bei der HPA mit dem Modell verschiedene Zufluss-Szenarien der vergangenen Winterhalbjahre mit dem für Ende Oktober hochgerechneten Baggerbedarf analysiert, um die Auswirkungen einer an die Abflussbedingungen orientierten Beaufschlagung der Umlagerstelle Neßsand auf die zu erwartenden Unterhaltungsdefizite in einzelnen Hafengebieten unter operativen sowie wirtschaftlichen und vertragsgestalterischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Weiter ist aus Modellrechnungen der BAW bekannt, dass es einen Baggerkreislauf zwischen dem WSV-Verbringbereich St. Margarethen (zwischen Störbogen und Brunsbüttel gelegen) und Hamburg gibt. Bei St. Margarethen verbrachtes feinkörniges Baggergut wird bei niedrigen Oberwasserzuflüssen vorwiegend wieder Richtung stromauf transportiert. Es ist auch hier von einer Anreicherung des lokalen Schwebstoffgehaltes im inneren Ästuar auszugehen. Indizien, die diese Anreicherung bzw. einen verstärkten Stromauftransport in der Niedrigwasserphase 2013f belegen, sind die aus Abbildung 24 ersichtliche Zunahme oberflächennaher Schwebstoffgehalte im Bereich Elbe-km 681,4 bis 710,0 und die Veränderungen im südlichen Gewässerbereich zwischen St. Margarethen und Wischhafen (vgl. Kapitel 2.6.1 bzw. Abbildung 32). Mit dem Konzept des Sedimentfangs Wedel (vgl. BfG 2014) erfolgt bereits seit 2008 und mit Vorratsbaggerungen im Bereich Juellssand seit 2016 eine praktische Berücksichtigung der Oberwasserabhängigkeit und damit eine Optimierung. Das Wedeler/Juellssander Baggergut wird seitdem vorrangig im März/April eines Jahres und damit zu einer Zeit umgelagert, in der im langjährigen Mittel die höchsten Oberwasserzuflüsse auftreten. Gleichzeitig können so Baggerungen während der Laichzeit der Rote-Liste-Art Finte vermieden werden.

Eine vollständige Auflösung der beiden geschilderten Baggerkreisläufe wird aufgrund der zu berücksichtigenden Schadstoffaspekte nicht möglich sein. Bei langanhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen sollten die Baggerkreisläufe aber durch weiträumigere Verbringungen Richtung St. Margarethen (HPA-Baggergut) und Mündungstrichter (Wedeler/Juellssander Baggergut, HPA-Baggergut) entlastet werden. Dabei kann als gesichert gelten, dass die Schadstoffbelastung des Baggergutes bei langanhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen deutlich geringer als zu Zeiten eines mittleren oder sogar hohen Oberwasserzuflusses ist. Ein niedriger Oberwasserzufluss bewirkt einen sich verstärkenden Stromauftransport und erhöht damit den Anteil mariner und nur gering belasteter Sedimente (BfG 2014).

Weitere Optimierungen für beide Baggerkreisläufe sowie Empfehlungen im Hinblick auf die Entlastung durch weiträumigere Verbringungen können zukünftig u. a. mit Hilfe der Berücksichtigung von Oberwasservorhersagen (aktuell in Erprobung) und mittel- bis langfristig mit Einführung operationeller Modelle erfolgen.

8 Schlussbemerkung

Der inhaltliche Schwerpunkt dieses Artikels liegt in der Beschreibung und Erklärung der hydrologischen und morphologischen Entwicklung der Tideelbe – insbesondere für die Jahre von 2013 bis 2018 – sowie in der Formulierung der Handlungsempfehlungen, die sich nach Ansicht der Autoren daraus ergeben. Seit 2017 sinkt der Tidehub wieder. Eine abgesicherte Erklärung dieser Entwicklung kann derzeit nicht gegeben werden, da ein aktuelles digitales Geländemodell noch nicht vorliegt. Vermutlich sind auch hierfür morphologische Veränderungen im Mündungstrichter maßgeblich gewesen. Der Nachweis hierfür steht somit noch aus.

Zudem begannen im Februar 2019 die Baumaßnahmen für die Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe. Zunächst wurden die Randdämme der Unterwasserablagerungsflächen hergestellt, danach die Fahrrinne im WSV-Bereich zwischen Wedel und Glückstadt verbreitert und ab Oktober 2019 um durchschnittlich 1 m vertieft. Diese Baumaßnahmen beeinflussen die Tidedynamik und müssen bei zukünftigen Untersuchungen

der hydrologischen und morphologischen Entwicklung der Tideelbe explizit berücksichtigt werden.

9 Literaturverzeichnis

BAW: Handlungsoptionen zur Optimierung der Unterhaltungsstrategie im Mündungstrichter der Tideelbe. BAW-Nr. A39550310069, 2013.

BAW: Kalibrierung von Trübungsmessungen für Aussagen zur Schwebstoffkonzentration in den Ästuaren Weser und Elbe. Internes FuE-Vorhaben BAW-Nr. B3955.02.04.70227-1, 2018.

BfG: Sedimentmanagement Tideelbe – Strategien und Potenziale – Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. BfG-1763, Koblenz, 2014.

BfG: Auswirkungsprognose für die Unterbringung von sandigem Baggergut in der Unterelbe (Amtsbereich WSA Hamburg). BfG-1871, Koblenz, 2015.

BfG: Ermittlung der Gewässersohle in hydroakustisch schwer zu vermessenden Gebieten im Bereich der Tideelbe. Bearbeiter: Herr Dr. Weiß. BfG-1931, Koblenz, 2017a.

BfG: Auswirkungsprognose für die Unterbringung von Baggergut im Verbringstellenbereich VSB 730/740 in der Außenelbe, BfG-1922, Koblenz, 2017b.

Entelmann, I.; Röper, H.: Überlegungen für ein zukünftiges Sedimentmanagement Tideelbe. In: Hafentechnische Gesellschaft, HTG-Kongress 2014 (Tagungsband). S. 540–551. Berlin, Mai 2014.

Entelmann, I.; Strotmann, T.; Weilbeer, H.; Winterscheid, A.; Shaikh, S.; Vaessen, B.: Diskussionspapier zur Entwicklung der Unterhaltungssituation in der Tideelbe. Interner Bericht (WSV, HPA, BAW, BfG) der AG Sedimentmanagement mit Schwerpunkt morphologische Aspekte. 2018.

Fickert, M.; Strotmann, T.: Zur Entwicklung der Tideverhältnisse in der Elbe und dem Einfluss steigender Meeresspiegel auf die Tidedynamik in Ästuaren. In: Tagungsband HTG-Kongress 2009. 196–203, 2009.

Grothaus, V.: Analyse empirisch-statistischer Modelle zur Quantifizierung der Einflussgrößen auf die Tidedynamik im Elbeästuar. Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2013.

Hillmann, S.: Variabilität der Trübungs- und Brackwasserzone der Weser und Elbe anhand von langjährigen Naturmessdaten. Masterthesis, RWTH Aachen, 2017.

HPA: „Hydromorphologische und ökologische Bewertung der Umlagerung von Sand in die Riffelstrecke der Unterelbe inkl. der Ergebnisse des Monitorings aus dem Frühjahr 2016. Interner Bericht. Bearbeiter: Ohle, N., Karrasch M., Gebert, J., Strotmann, T., 2016.

Jensen, J.; Mudersbach, CH.; Blasi, CH.: Hydrological changes in tidal estuaries due to natural and anthropogenic effects, Proceedings of the 6. International MEDCOAST 2003-Conference, Ravenna, Italy, 2003.

Loder, M.: Entwicklung der Trübungszone der Tideelbe von 2013 bis 2017. Masterarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2017.

Pettitt, A. N.: A non-parametric approach to the change-point problem. In: Journal of the Royal Statistical Society., Applied statistics, 28(2), 1979.

Reiß, M.: Analyse der Sedimentationsdynamik im Baggerabschnitt Osteriff an der Tideelbe. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt, Dezember 2015.

Strom- und Hafengebäude Hamburg und WSA Hamburg: Zur Entwicklung des Tideniedrigwassers 1993/1994 in der Unterelbe. Studie Nr. 82 des Referats SB5 des Amtes Strom- und Hafengebäude, zugleich Studie Nr. 4 des WSA Hamburg. 1996.

Strotmann, T.; Grothaus, V.: Assessment of Empirical Methods to Quantify the Influence of Outer Boundary Conditions on Tidal Characteristics in the Elbe Estuary. 7th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (CGJOINT), 2014.

Sturmflutarchiv: Universität Siegen www.bau.uni-siegen.de/fwu/wb/publikationen/sturmflutarchiv/

Winterscheid, A.; Reiß, M.; Shaikh, S.: About the Analysis of Sedimentation Dynamics in an Estuarine Waterway and its Implications on Sediment Management Concepts. doi:10.3850/38WC092019-0902. 38th IAHR World Congress, Panama City, 2019.

WSA Hamburg: Gewässerkundlicher Bericht „Morphologische Strukturen im Fahrrinnenbereich der Tideelbe. Ein Beitrag zum Reviersteckbrief Tideelbe. Az. 2-231.2 El/107; Bearbeiter: Entelmann, I.; Qrefa-Sander, M., 2013.

WSA Hamburg: Gewässerkundlicher Bericht „Morphologische Entwicklung im Fahrwasserbereich zwischen Elbe 638,9 bis 689,1 im Zeitraum 2008–2014. Az. 2-231.2 El/107; Bearbeiter: Entelmann, I.; Fabis, F.; Qrefa-Sander, M., 2016.

WSD Nord und HPA: Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe. 2008.